



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

CLT-RAKENTEIDEN MITOITTAMINEN JA KÄYTTÖ P2-PALOLUOKAN HOIVARAKENNUKSESSA

Arto Koski

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Kesäkuu 2021

TIIVISTELMÄ

CLT-rakenteiden mitoittaminen ja käyttö P2-paloluokan hoivarakennuksessa

Arto Koski

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 78 s. + 5 liitettä

Työn ohjaaja yliopistolla: Antti Niemi

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia CLT-rakenteiden ja niiden välisten liitosten mitoitusmenetelmiä sekä arvioida niiden soveltuvuutta käytännön suunnittelutyöhön. Lisäksi työssä tutkitaan, voidaanko mallikohteena käytetyn kaksikerroksisen betonirakenteisen palvelutalon kantavat rakenteet korvata CLT-rakenteilla. Lopputuloksena voidaan tuottaa CLT-rakenteisen palvelutalon valmiit rakennesuunnitelmat.

Työn teoriaosuudessa käydään läpi CLT-rakenteiden mitoittamisen menetelmiä sekä niiden eroavaisuuksia. Taivutetun CLT-rakenteen laskentamenetelmistä käydään läpi Eurokoodi 5:een perustuva Gamma-menetelmä sekä leikkausanalogia. Tasoa vastaan kohtisuoran sekä tason suuntaisen leikkausjännityksen kuormittavia rakenteita tutkitaan puolestaan eri mitoitusilanteiden ja murtomekanismien kautta. Rakennetta puristavien voimien kuormittamat rakenteet sekä puristukseen liittyvät stabiiliteetti-ilmiöt nurjahdus ja kiepahdus käydään myös läpi. CLT-rakenteisen välipohjan värähtelymitoitukseen käytettäviä menetelmiä esitetään kolme, jotka ovat Suomen kansallisen liitteen menetelmä, Wallner-Novak et al. -menetelmä sekä Canadian CLT Handbookin menetelmä.

Työssä käydään myös läpi, miten CLT käyttäytyy palotilanteessa sekä esitetään palomitoituksessa käytettävät hiiltymisnopeudet, poikkileikkausarvot ja poikkileikkaukset. Lisäksi selvitetään, mitä teknisiä vaatimuksia Suomen rakennuslainsäädäntö asettaa paloturvallisuuden, ääneneristävyyden ja energiatehokkuuden suhteen CLT-rakenteille P2-paloluokassa.

Mallikohteeseen sovellettujen CLT-rakenteiden mitoittaminen on suoritettu teoriaosuuden menetelmiä noudattaen. CLT-rakenteiden ääneneristävyyden ja U-arvon teoriaa ei työssä käsitelty, joten rakenteiden määrittämisessä käytettiin apuna Stora Enson Calculatis -ohjelmistoa ääneneristävyyden suhteen sekä Laskentapalvelut.fi -sivuston laskentaohjelmistoa U-arvon suhteen.

Teorian pohjalta suoritettujen rakennelaskelmien tulosten perusteella voidaan todeta, että tulosten tarkkuuden puolesta sekä Gamma-menetelmä että leikkausanalogia soveltuvat CLT-rakenteiden laskemiseen, kun kyseessä on taivutuskestävyyden tai taipuman laskenta. Nurjahduksen laskennassa sen sijaan eroa menetelmillä saatujen tulosten välillä saatiin huomattavasti, yli 12 %.

Värähtelymitoitusmenetelmien välillä havaittiin niin ikään merkittäviä eroja. Mallikohteen välipohjarakenteen värähtelymitoituksen tulosten välillä oli eroa jopa yli 13 %. Laskelmat suoritettiin vain yhdelle rakenteelle, joten kyseistä tulosta ei tule kuitenkaan yleistää. Menetelmien teoreettisten ja tulosten eroavaisuuksien perusteella värähtelymitoitusmenetelmät vaativat jatkotutkimusta.

Tehtyjen rakennelaskelmien perusteella voidaan todeta, että betonirakenteisen mallikohteen toteuttaminen CLT-rakenteilla on haastavaa ilman muutoksia vaakarakenteiden jänneväleihin. Erityisesti CLT-rakenteisen välipohjan värähtelyominaisuudet eivät ole riittävät verrattuna betonirakenteeseen. Pienillä muutoksilla vaakarakenteiden jänneväleihin päästään kuitenkin kohtuullisiin CLT-rakenneratkaisuihin.

Asiasanat: CLT, Gamma-menetelmä, leikkausanalogia, hoivarakennus

ABSTRACT

Design of CLT structures and application in P2 fire class nursing home

Arto Koski

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2021, 83 p. + 5 appendixes

Supervisor at the university: Antti Niemi

The objective of this master's thesis is to familiarize with design methods of CLT structures and their connecting joints, and to consider their applicability in practical design. In addition, replacing concrete structures of a real-life two storey nursing home with CLT structures, is discussed. Finally, a nursing home is completely designed with CLT structures.

The theoretical part of this thesis is about design methods of CLT structures and the differences between them. Presented calculation methods for CLT structures under bending load are the Eurocode 5 based Gamma method and shear analogy. Structures with either in-plane or out-of-plane shear stresses are considered by different design aspects and failure mechanisms. Structures under compressive axial load and related phenomena buckling and lateral torsional buckling are also examined. Also three vibration design methods for CLT floor structures are presented which are the Finnish National Annex method, the Wallner-Novak et al. method and the Canadian CLT Handbook method.

Fire performance of CLT is assessed through applied charring rates, cross-sectional values and cross-sections in fire design. The technical demands of new buildings set by Finnish building codes are also examined. Demands included in this thesis are fire safety, sound insulation and energy efficiency aspects for CLT structures used in P2 fire class nursing home.

The design and calculations for the applied CLT structures are performed according to the methods presented in the theoretical part of this thesis. The theories of sound insulation and energy efficiency of CLT structures were not discussed, so the sound insulation calculations are performed using Stora Enso's Calculatis software and the energy efficiency calculations using Laskentapalvelut.fi software respectively.

Based on the results of performed calculations it is safe to assume that both, the Gamma-method and the shear analogy, are well fit for the design of CLT structures under bending load and verifications of deflections. However, the difference between the two methods was over 12 % regarding buckling of CLT members.

Differences between the three vibration verification methods were substantial aswell. The results of the calculated CLT floor structure varied considerably, as much as 13 %. The calculations were performed for a single structure only so the results should not be generalized. However, considering major differencies between the theories of each method, further research on the matter is recommended.

Replacing concrete structures with CLT structures was found out to be challenging without reductions in floor spans. Especially the vibration performance of CLT floor structure was not sufficient enough compared to the concrete structure. With slight modifications to the floor spans, CLT structures were found out to be able to replace concrete structures reasonably.

Key words: CLT, Gamma method, shear analogy, nursing home

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin osana Oulun yliopiston rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelmaa. Työn toimeksiantajana toimi Insinööri- ja arkkitehtitoimisto Oy Palola & Piispanen, jota kiitän mielenkiintoisesta työn aiheesta. Työ on tehty suurimmaksi osin pätikkäin työtehtävien lomassa aikavälillä kevät 2018 – kevät 2021.

Haluan kiittää työni ohjaajia, jotka olivat Oulun yliopistolta professori Antti Niemi sekä toimeksiantajan puolelta DI Samuli Palola. Kiitän myös kaikkia muita työssä mukana olleita ja sitä kommentoineita henkilöitä.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni opintojeni aikaisesta avusta sekä avopuolisoani Katjaa tämän työn aikaisesta suuresta tuesta sekä kannustuksesta.

Oulu, 24.6.2021



Arto Koski

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT

1 JOHDANTO	14
2 CLT:n rakenteelliset ominaisuudet	15
2.1 Poikkileikkausarvojen määrittäminen	18
3 Murtorajatilamitoitus.....	20
3.1 Taivutuskestävyys	20
3.1.1 Gamma-menetelmä.....	20
3.1.2 Leikkausanalogia	24
3.2 Tasoa vastaan kohtisuora leikkaus	26
3.3 Tason suuntainen leikkaus	28
3.3.1 Paneelileikkauskestävyys	28
3.3.2 Lamellileikkauskestävyys.....	29
3.3.3 Lamellien kosketuspinnan vääntöleikkauskestävyys	31
3.4 Puristuskestävyys pitkittäiskerrostien suunnassa	32
3.5 Puristuskestävyys kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan.....	33
3.6 Nurjahdus	35
3.6.1 Gamma-menetelmä.....	35
3.6.2 Leikkausanalogia	37
3.7 Kiepahdus.....	38
4 Käyttörajatila.....	42
4.1 Taipuma.....	42
4.1.1 Gamma-menetelmä.....	42
4.1.2 Leikkausanalogia	43
4.2 Värehtely	44
4.2.1 Suomen kansallisen liitteen menetelmä.....	45
4.2.2 Wallner-Novak et al. -menetelmä.....	46
4.2.3 Canadian CLT Handbook	49
5 CLT:n palomitoitus	51

6 Tekniset vaatimukset.....	55
6.1 Paloturvallisuus	55
6.1.1 Rakennuksen paloluokka ja rakenteiden kantavuuden vaatimus.....	55
6.1.2 Pintaluokka- ja suojaverhousvaatimukset.....	56
6.2 Ääneneristävyys	56
6.3 Energiatehokkuus	58
7 Palvelutalo Oulu Sienitie.....	59
8 Palvelutaloon soveltuvat CLT-rakenteet.....	62
8.1 Välipohjarakenne	62
8.2 Yläpohjarakenne	64
8.3 Kantava ulkoseinärakenne	66
8.4 Kantava väliseinärakenne.....	68
9 Johtopäätökset ja suositukset	69
10 Yhteenveto	73

LÄHDELUETTELO

LIITTEET

MERKINNÄT

LATINALAISET ISOT KIRJAIMET

A	Poikkileikkauksen kokonaispinta-ala
A_{eff}	Tehollinen pinta-ala
A_i	Poikkileikkauksen osan pinta-ala
A_{net}	Pienempi arvo pitkittäis- ja poikittaisherrosten pinta-aloista
A_0	Kuorman suuntaisten lamellikerrosten pinta-ala
B	Poikkileikkauksen leveys
B_h	Lattiarakenteen leveys poikittaissuunnassa
D	Vaimennuskerroin
E_c	Viitekimmomoduuli
E_0	Kimmomoduuli syysuunnassa
E_{90}	Kimmomoduuli kohtisuoraa syysuuntaa vastaan
$E_{0,05}$	Viiden prosenttiin (alempaa) fraktiilia vastaava kimmomoduulin arvo
E_{I0}	Poikkileikkauksen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa
E_{I90}	Poikkileikkauksen taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa
$E_{I\text{eff},0}$	Poikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa
$E_{I\text{eff},90}$	Poikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa
E_{Ip}	Palkilta vaadittava taivutusjäykkyys
F	Henkilön painon aiheuttama staattinen pistekuorma
F_s	Staattisen mallin huomioiva kerroin
F_0	Kävelevän henkilön aiheuttama kuorma
GA_{eff}	Tehollinen leikkausjäykkyys
G_0	Liukumoduuli syysuunnassa
G_{90}	Liukumoduuli kohtisuoraa syysuuntaa vastaan
$G_{0,05}$	Viiden prosenttiin (alempaa) fraktiilia vastaava liukumoduulin arvo
G_R	Vierintäliukumoduuli
H	Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus
H_s	Rakenteen kokonaiskorkeus
I	Neliömomentti
I_0	Pitkittäisherrosten neliömomentti
$I_{\text{eff},0}$	Poikkileikkauksen tehollinen neliömomentti pitkittäissuunnassa

I_{tor}	Vääntöneliömomentti
I_y	Neliömomentti y-akselin suhteen
I_z	Neliömomentti z-akselin suhteen
K	Mekaanisen liittimen siirtymäkerroin
L	Jänneväli
L_{eff}	Tehollinen jänneväli
L_E	Rakenteen nurjahduspituus
L_p	Rakennetta tukevan palkin jänneväli
L_1	Huoneen suurin sivumitta
M	Modaalimassa
M_d	Momentin mitoitusarvo
N_E	Eulerin nurjahdusvoima
$N_{E,v}$	Leikkausmuodonmuutokset huomioiva Eulerin nurjahdusvoima
$N_{0,d}$	Pitkittäiskerrosten suuntaisen puristusvoiman mitoitusarvo
$N_{90,d}$	Puristusvoiman mitoitusarvo kohtisuoraa pitkittäiskerroksia vastaan
S_R	Staattinen momentti
S_0	Staattinen momentti
S_{05}	Jäykkyysominaisuuden 5 % fraktiili normaalilämpötilassa
S_{20}	Jäykkyysominaisuuden 20 % fraktiili normaalilämpötilassa
V_d	Leikkausvoiman mitoitusarvo
W_y	Taivutusvastus vahvemman, y-akselin suhteen

LATINALAISET PIENET KIRJAIMET

a	Yksittäisen lamellin leveys
a_f	Ominaistaajuuden huomioiva kerroin
a_{max}	Rakenteen levein lamelli
a_{rms}	Henkilön kävelystä rakenteeseen syntyvä kiihtyvyys
a_0	Pitkittäiskerrosten lamellien leveys
a_{90}	Poikittaiskerrosten lamellien leveys
b	Lamellikerroksen leveys
b_{eff}	Rakenteen tehollinen leveys
c_1	Apukerroin
d	Lamellikerroksen keskipisteen etäisyys poikkileikkauksen painopisteestä
$d_{char,0}$	Hiiltemissävyvyyden suunnitteluarvo

d_{eff}	Teoreettinen lujuuden ja jäykkyyden menettänyt kerros
d_n	Poikkileikkauksen painopisteen sisältävän kerroksen keskipisteen etäisyys poikkileikkauksen painopisteestä
d_0	Lujuuden ja jäykkyyden menettäneen kerroksen paksuus
h	Lamellikerroksen paksuus
h_n	Poikkileikkauksen painopisteen sisältävän kerroksen paksuus
h_s	Uloimpien lamellikerrosten keskilinjojen välinen etäisyys
h_0	Kuorman suuntaisten lamellikerrosten yhteenlaskettu paksuus
$f_{c,0,d}$	Puristuslujuuden mitoitusarvo pitkittäiskerrosten suunnassa
$f_{c,0,k}$	Puristuslujuuden ominaisarvo syysuunnassa
$f_{c,90,d}$	Puristuslujuuden mitoitusarvo kohtisuoraa pitkittäiskerroksia vastaan
$f_{c,90,k}$	Puristuslujuuden ominaisarvo kohtisuoraa syysuuntaa vastaan
$f_{d,fi}$	Palotilanteen lujuuden mitoitusarvo
f_k	Lujuuden ominaisarvo
$f_{m,k}$	Taivutuslujuuden ominaisarvo
$f_{m,d}$	Taivutuslujuuden mitoitusarvo
$f_{t,0,k}$	Vetolujuuden ominaisarvo
$f_{v,d}$	Leikkauslujuuden mitoitusarvo
$f_{v,0,k}$	Leikkauslujuuden ominaisarvo syysuunnassa
$f_{v,90,k}$	Leikkauslujuuden ominaisarvo kohtisuoraan syysuuntaa vastaan
$f_{v,R,d}$	Vierintäleikkauslujuuden mitoitusarvo
$f_{v,R,k}$	Vierintäleikkauslujuuden ominaisarvo
$f_{v,S,d}$	Leikkauslujuuden mitoitusarvo kohtisuoraa syysuuntaa vastaan
$f_{v,T,d}$	Vääntöleikkauslujuuden mitoitusarvo
$f_{v,T,k}$	Vääntöleikkauslujuuden ominaisarvo
f_l	Rakenteen alin ominaistuu
g_k	Pysyvän kuorman ominaisarvo
k	Epälineaarisuuteen liittyvä apusuure
k_b	Lamellien leveyden huomioiva kerroin
k_c	Epälineaarisuuskerroin
$k_{c,90}$	Kuorman sijainnin, halkeamismahdollisuuden ja puristuman suuruuden huomioiva kerroin
k_{crit}	Kiepahduksen mitoitus ehdossa käytettävä kerroin
k_{def}	Virumaluku

k_f	Palotilanteessa käytettävä kerroin
k_L	Huoneen koosta riippuva taipumarajoituksen korotuskerroin
k_{mod}	Käyttöluokkakerroin
$k_{mod,fi}$	Käyttöluokkakerroin palotilanteessa
k_{sys}	Kuorman jakoluku
k_0	Palolle altistuneen ajan huomioiva kerroin
k_δ	Poikkileikkauksen poikkileikkauksen huomioiva kerroin
m_0	Rakenteen massa pinta-alayksikköä kohden
m_q	Rakenteen massa pinta-alayksikköä kohden ja hyötykuormasta 30 kg/m ² yhteen laskettu massa
n	Liimakerrosten kokonaismäärä rakenteessa
n_L	poikkileikkauksen painopistettä lähimmän pitkittäiskerroksen järjestysnumero
o	Lamellikerroksen keskipisteen etäisyys poikkileikkauksen yläreunasta
q_k	Muuttuvan kuorman ominaisarvo
s	Mekaanisten liittimien jakoväli
t	Rakenteen palolle altistunut aika
w_{inst}	Hetkellinen kokonaistaipuma
$w_{inst,g}$	Pysyvän kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma
$w_{inst,q}$	Muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma
w_{fin}	Lopputilan taipuma
z_o	Poikkileikkauksen painopisteen etäisyys poikkileikkauksen yläreunasta
z_u	Poikkileikkauksen painopisteen etäisyys poikkileikkauksen alareunasta

KREIKKALAISET KIRJAIMET

β_c	Suoruukskerroin
β_0	Hiiltymisnopeus
γ	Liitoksen hyötysuhdekerroin
γ_M	Materiaaliosavarmuuskerroin
$\gamma_{M,fi}$	Materiaaliosavarmuuskerroin palotilanteessa
δ	Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma
κ	Leikkauksen korjauskerroin
λ	Taivutusta vastaava suhteellinen hoikkuus mitoitettavassa suunnassa
λ_{rel}	Suhteellinen hoikkuus mitoitettavassa suunnassa
$\lambda_{rel,m}$	Suhteellinen hoikkuus kiepahduksen yhteydessä
$\sigma_{c,0,d}$	Pitkittäiskerrosten suuntainen puristusjännityksen mitoitusarvo
$\sigma_{c,90,d}$	Puristusjännityksen mitoitusarvo kohtisuoraa pitkittäiskerroksia vastaan
$\sigma_{m,crit}$	Kriittinen taivutusjännitys
$\sigma_{m,d}$	Taivutusjännityksen mitoitusarvo
$\tau_{v,d}$	Leikkausjännityksen mitoitusarvo
$\tau_{v,R,d}$	Vierintäleikkausjännityksen mitoitusarvo
$\tau_{v,S,d}$	Leikkausjännityksen mitoitusarvo kohtisuoraa syysuuntaa vastaan
$\tau_{T,d}$	Vääntöleikkausjännityksen mitoitusarvo
ψ_2	Muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin

1 JOHDANTO

Työssä tutkitaan CLT-rakenteiden mitoitusmenetelmiä ja arvioidaan niiden soveltuvuutta käytännön suunnittelutyöhön. Lisäksi työssä selvitetään, voidaanko kaksikerroksisen, betonirakenteisen hoivarakennuksen kantava runko korvata CLT-rakenteilla. Työn toimeksiantajana toimii Insinööri- ja arkkitehtitoimisto Oy Palola & Piispanen.

CLT eli Cross-Laminated Timber on verrattain uusi rakennusmateriaali, jota käytettiin ensimmäisen kerran Itävallassa ja Saksassa 1990-luvun alussa. CLT-rakenteiden mitoittamiseen ei vielä tällä hetkellä ole esitetty menetelmiä Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu -standardissa, joten työn teoriaosuudessa käydään läpi tämänhetkisiä menetelmiä CLT-rakenteiden mitoittamiseen murto- ja käyttörajatiloissa sekä arvioidaan niiden eroavaisuuksia sekä soveltuvuutta käytännön suunnittelutyöhön. Samalla huomioidaan CLT-rakenteiden mitoituksen erityispiirteitä tavallisen puurankarakenteen mitoitukseen verrattuna. Työssä käsitellään vain liimaamalla valmistettuja CLT-rakenteita. Muilla valmistusmenetelmillä, kuten naulaamalla tai vaarnoilla valmistetut CLT-rakenteet, on rajattu työn ulkopuolelle.

Työn teoriaosuudessa perehdytään lisäksi Suomen maankäyttö- ja rakennuslain rakennuksille asettamiin vaatimuksiin, joita ovat muun muassa paloturvallisuus, energiatehokkuus sekä ääneneristys. CLT-rakenteiden käyttäytymistä palotilanteessa käsitellään, mutta rakenteiden energiatehokkuuden ja ääneneristävyyden laskennan teoria on rajattu työn ulkopuolelle. Suomen maankäyttö- ja rakennuslain asettamat vaatimukset rakenteille kuitenkin huomioidaan hoivarakennukseen sovellettavissa rakenteissa.

Työn tuloksena saadaan vahva teoriapohja CLT-rakenteiden mitoittamiseen sekä soveltuvuus hoivarakentamiseen. Mallikohteeseen soveltuvat rakennetyypit toimitetaan työn yhteistyökumppanille Rakennusliike Lapti Oy:lle, joka omalta osaltaan voi työn pohjalta suorittaa mallikohteen kustannuslaskennan.

2 CLT:N RAKENTEELLISET OMINAISUUDET

CLT on verrattain uusi rakennusmateriaali, joka luokitellaan massiivipuurakenteeksi. Sitä on ensimmäisen kerran käytetty Itävallassa ja Saksassa 1990-luvun alussa, ja vuosikymmenen puolivälissä Itävalta käynnisti teollisakateemisen kehitysprojektin, jonka tuloksena saatiin nykyaikainen CLT-rakenne. Sen käyttö on vähitellen lisääntynyt 2000-luvulla ja tänä päivänä se tarjoaa varteenotettavan vaihtoehdon tiili-, betoni- ja teräsrakenteille varsinkin korkeissa rakennuksissa. CLT tarkoittaa massiivipuulevyä, joka koostuu toisiinsa nähden ristiin liimatuista lauta- eli lamellikerroksista, joita on tyypillisesti pariton määrä kolmesta seitsemään. Tiettyjä rakenteellisia ominaisuuksia tavoiteltaessa voidaan päällekkäiset kerrokset liimata myös yhdensuuntaisesti. Liimaamisen sijasta voidaan käyttää myös mekaanisia kiinnikkeitä, kuten nauloja tai vaarnoja. (Karacabeyli ja Gagnon 2019, s. 18, 21) Tässä työssä käsitellään kuitenkin vain liimattuja CLT-levyjä.

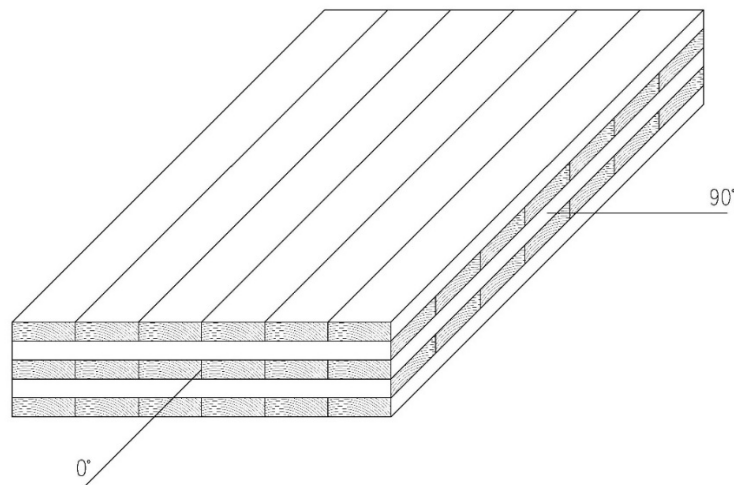
Levyjen suurimmat mahdolliset dimensiot vaihtelevat valmistajittain. Tyypillisen levyn paksuus vaihtelee välillä 105–245 millimetriä, mutta erikoistapauksissa se voi olla jopa yli 500 millimetriä. Suurin mahdollinen leveys on yleensä 3 metriä ja pituus 18 metriä. Levyjen kuljettaminen voi kuitenkin asettaa rajoituksia levyjen todellisille mitoille. Levyissä käytettävä puutavara on yleensä paksuudeltaan 16–51 millimetriä ja leveydeltään 60–240 millimetriä. Levyt valmistetaan sormijatketusta puutavarasta, jonka tulee olla lujuuslajiteltua. (Karacabeyli ja Gagnon 2019, s. 21)

CLT tarjoaa rakennusmateriaalina merkittäviä etuja tavanomaisiin materiaaleihin verrattuna. Ne ovat tiiviitä, energiatehokkaita sekä sitovat ja luovuttavat kosteutta, mikä parantaa sisäilman laatua. Muihin puurakenteisiin verrattuna CLT:n palonkestävyys on erinomainen massiivisen rakenteensa ansiosta, sillä pinnan hidas hiiltyminen suojaa alempia kerroksia. CLT-elementtien esivalmistusaste on korkea ja niiden pystytysaika on lyhyt. CLT-rakenteet ovat myös kevyempiä kuin betonirakenteet, mikä mahdollistaa pienemmät perustukset. (Stora Enso 2017, s. 7) Lisäksi CLT on ympäristöystävällinen ja vastuullinen valinta, sillä sen käyttö vähentää uusien rakennusten hiilijalanjälkeä merkittävästi, jopa yli 40 % (Liu et al. 2016, s. 12).

Euroopassa CLT-rakenteiden jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksien laskemiseen on kehitetty useita eri teorioita, joista osa ovat kokeellisia toisten ollessa täysin analyyttisiä.

Kokeellisissa menetelmissä rakenteen ominaisuudet määritetään täysmittakaavakokeissa, jotka tulee suorittaa aina uudelleen minkä tahansa materiaali- tai poikkileikkausominaisuuden muuttuessa. Analyyttisten menetelmien etu kokeellisiin verrattuna on niiden sovellettavuus ja taloudellisuus; kun teorian laskennalliset tulokset vahvistetaan kokeellisesti, voidaan teoriaa käyttää jatkossa halutun poikkileikkauksen mitoittamiseen. Yleensä analyttisiä menetelmillä saadaan laskettua tarvittavat ominaisuudet, kun tiedetään levyn materiaaliominaisuudet sekä lamellikerrosten geometria ja suunnat toisiinsa nähden. (Popovski et al. 2019, s. 118)

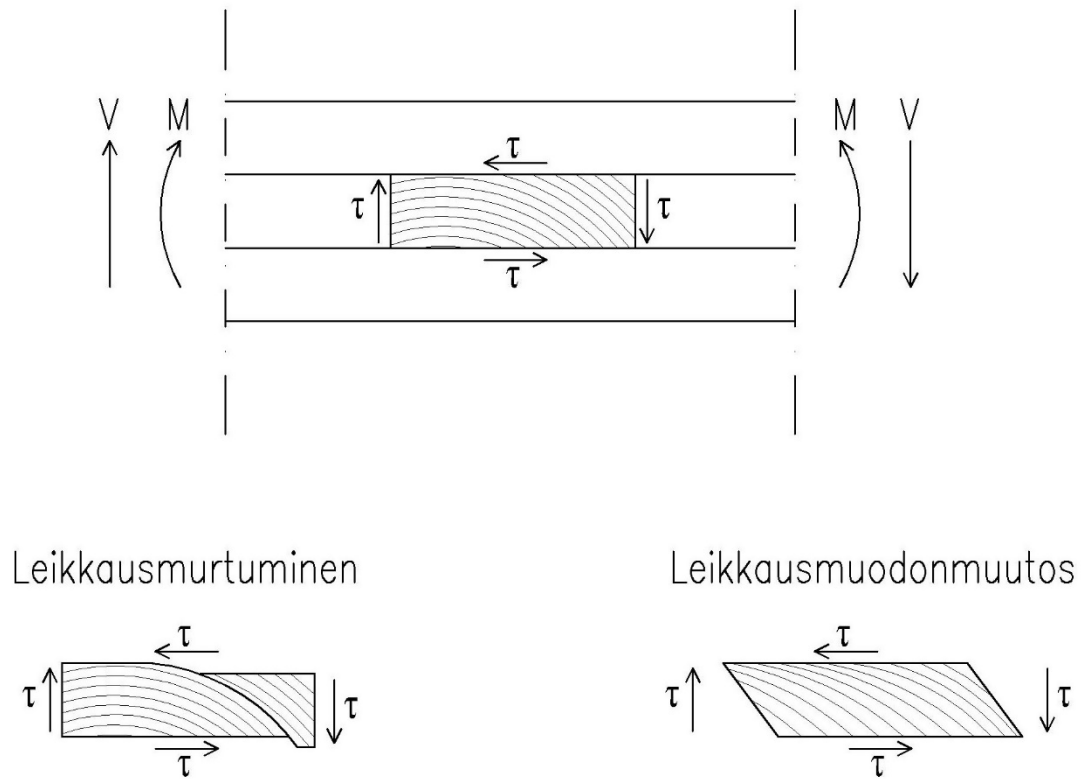
Kuvassa 1 on esitetty tyypillisen, viisikerroksisen CLT-levyn rakenne, jossa levyn pitkittäissuuntaiset lamellikerrokset muodostavat kuorman pääasiallisen kantosuunnan. Levyn jäykkyys pitkittäiskerrosten suunnassa on suurempi kuin poikittaissuunnassa ja sen yhteydessä käytetään tunnusta 0° . Vastaavasti poikittaissuunnan yhteydessä käytetään tunnusta 90° . (Wallner-Novak et al. 2014, s. 13)



Kuva 1. Tyypillisen CLT-levyn rakenne ja kerroksista käytettävät merkinnät (mukaillen Wallner-Novak et al. 2014, s. 13).

Rakenteellisessa mitoituksessa poikittaiskerrokset ajatellaan yleensä pitkittäiskerroksia yhdistävinä mekaanisina liittiminä, joihin kohdistuu ainoastaan leikkausjännityksiä. Nämä leikkausjännitykset tulee huomioida mitoituksessa, sillä ne aiheuttavat muodonmuutoksia sekä mahdollisia leikkausmurtumia yksittäisen lamellin vuosirenkaiden suunnassa. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 14)

Kuvassa 2 on havainnollistettu poikittaislamellin käyttäytymistä siihen kohdistuessa leikkausjännityksiä.



Kuva 2. CLT-levyn poikittaislamellin käyttäytyminen siihen kohdistuessa leikkausjännityksiä (mukaillen Wallner-Novak et al. 2014, s. 14).

CLT-rakenteiden mitoituksessa tulee käyttää projektikohtaisesti valmistajien ilmoittamia materiaaliarvoja. Alustavassa mitoituksessa tai tilanteissa, joissa jokin materiaaliarvo ei ole tiedossa, voidaan käyttää taulukon 1 mukaisia ominaisarvoja.

Taulukko 1. CLT-rakenteille käytettäviä ominaisarvoja (mukaillen Wallner-Novak et al. 2018, s. 13)

Materiaaliarvo	Lyhenne	Arvo [N/mm ²]
Kimmomoduuli syysuunnassa	E_0	11550
Kimmomoduuli kohtisuoraa syysuuntaa vastaan	E_{90}	450
Kimmomoduulin viiden prosentin (alempaa) fraktiilia vastaava arvo	$E_{0,05}$	9625
Liukumoduuli syysuunnassa	G_0	690
Liukumoduuli kohtisuoraa syysuuntaa vastaan	G_{90}	65

Liukumoduulin viiden prosentin (alempaa) fraktiilia vastaava arvo	$G_{0,05}$	570
Vierintäliukumoduuli	G_R	65
Taivutuslujuuden ominaisarvo	$f_{m,k}$	24,0
Vetolujuuden ominaisarvo	$f_{t,0,k}$	14,0
Puristuslujuuden ominaisarvo syysuunnassa	$f_{c,0,k}$	21,0
Puristuslujuuden ominaisarvo kohtisuoraa syysuuntaa vastaan	$f_{c,90,k}$	3,0
Leikkauslujuuden ominaisarvo syysuunnassa	$f_{v,0,k}$	2,5
Leikkauslujuuden ominaisarvo kohtisuoraa syysuuntaa vastaan	$f_{v,90,k}$	5,0
Vierintäleikkauslujuuden ominaisarvo	$f_{v,R,k}$	1,1
Vääntöleikkauslujuuden ominaisarvo	$f_{v,T,k}$	2,5

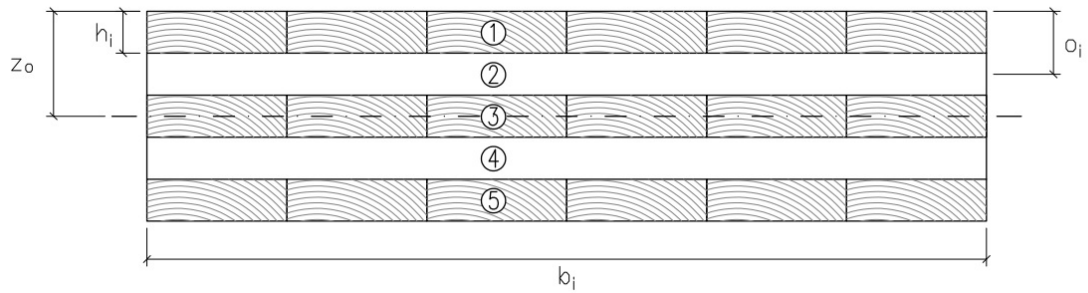
2.1 Poikkileikkausarvojen määrittäminen

Poikkileikkauksen painopiste sijaitsee symmetrisillä poikkileikkauksilla symmetria-akselilla. Epäsymmetrisiä poikkileikkauksia esiintyy kuitenkin keskenään eri lujuusluokan materiaaleja käytettäessä sekä esimerkiksi palomitoituksessa hiiltymisen seurauksena. Epäsymmetrisissä poikkileikkauksissa painopisteen akselin sijainti saadaan kaavalla

$$z_o = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} b_i h_i o_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} b_i h_i}, \quad (1)$$

missä z_o on painopisteen etäisyys poikkileikkauksen yläreunasta [mm],
 E_i on kerroksen i kimmomoduuli [MPa],
 E_c on viitekimmomoduuli [MPa],
 b_i on kerroksen i leveys [mm],
 h_i on kerroksen i paksuus [mm] ja
 o_i on kerroksen i keskipisteen etäisyys poikkileikkauksen yläreunasta [mm]. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 31)

Kuvassa 3 on esitetty poikkileikkauksen painopisteen laskennassa käytetyt merkinnät.



Kuva 3. CLT-poikkileikkauksen painopisteen laskennassa käytetyt merkinnät (mukaillen Wallner-Novak et al. 2014, s. 31).

Viitekimmomoduulin E_c arvona käytetään suurinta poikkileikkauksessa esiintyvää kimmomoduulin arvoa. Toinen hyvin usein rakenteen mitoituksessa vaadittu poikkileikkausarvo on neliömomentti, joka voidaan laskea vastaavasti yhtälöllä

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} b_i h_i d_i^2, \quad (2)$$

missä I on poikkileikkauksen neliömomentti [mm^4] ja d_i on etäisyys lamellikerroksen i keskipisteestä poikkileikkauksen painopisteeseen [mm] (Wallner-Novak et al. 2014, s. 31).

3 MURTORAJATILAMITOITUS

Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999, 117 a §) edellyttää, että rakenteet suunnitellaan kestävänsä niihin kohdistuvat kuormitukset koko niiden käyttöajan ajan. Suunnittelun tulee perustua hyväksyttyihin suunnittelumenetelmiin tai luotettaviin koetuloksiin. Ympäristöministeriön asetuksella voidaan tarvittaessa antaa tarkempia säännöksiä rakenteiden teknisistä vaatimuksista.

Rakenteiden tekniset vaatimukset otetaan suunnittelussa huomioon noudattamalla eurokoodeja sekä niiden kansallisia liitteitä (Ympäristöministeriön asetus 477/2014, 3 §). CLT-rakenteiden suunnittelua ei kuitenkaan käsitellä tämänhetkissä eurokoodeissa ollenkaan, joten niiden mitoittamiseen tulee tällä hetkellä soveltaa uusimpia tutkimuksia sekä suunnittelumenetelmiä. Tässä luvussa esitetään yleisimmät mitoitusilanteet murtorajatilassa sekä eri menetelmiä niiden suorittamiseen.

3.1 Taivutuskestävyys

Neljä yleisintä analyttistä menetelmää taivutetun CLT-rakenteen mitoittamiseen ovat Gamma-menetelmä, Kreuzingerin menetelmä eli leikkausanalogia, komposiittiteoria sekä Timoshenkon palkkiteoria. Yhteistä näille menetelmille on CLT-poikkileikkausten laskeminen yhteen suuntaan kantavina, yhden metrin levyisinä palkkikaistoina. (Popovski et al. 2019, s. 118, 157) Tässä kappaleessa käsitellään käytännön suunnittelutyöhön parhaiten soveltuvat menetelmät eli eurokoodiin pohjautuva Gamma-menetelmä sekä leikkausanalogia.

3.1.1 Gamma-menetelmä

CLT-rakenteen taivutuskestävyyden laskemiseen tällä hetkellä käytetyin menetelmä Euroopassa on Gamma-menetelmä, joka perustuu standardin SFS-EN 1995-1-1 liitteessä B esitettyyn menetelmään ”Mekaanisin liittimin kootut palkit”. Menetelmä on nimensä mukaisesti kehitetty palkeille, jonka osat ovat kiinnitetty toisiinsa tietyn jäykkyyden ja jakovälin omaavilla mekaanisilla liittimillä. Palkin taivutusjäykkyydelle lasketaan tehollinen arvo osien liitosten hyötysuhdekertoimilla, joiden arvo vaihtelee välillä 0–1. Hyötysuhdekertoimen ollessa nolla, ei osien välillä ole liitosta ollenkaan, ja vastaavasti

saadessaan arvon 1, vallitsee osien välillä täysin jäykkä liitos. (Popovski et al. 2019, s. 119)

Liitosten hyötysuhdekertoimien kaava on (SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 106)

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 E_i A_i}{L^2} \frac{s}{K_i} \right)}, \quad (3)$$

missä γ_i on liitoksen i hyötysuhdekerroin,
 E_i on osan i kimmomoduuli [N/mm²],
 A_i on poikkileikkauksen osan i pinta-ala [mm²],
 L on jänneväli [mm],
 s on mekaanisten liittimien jakoväli [mm] ja
 K_i on mekaanisen liittimen i siirtymäkerroin.

Liimatussa CLT-rakenteessa ei kuitenkaan ole mekaanisia liittimiä, vaan levyn pitkittäissuuntaiset kerrokset lasketaan kantaviksi ja poikittaiskerrokset kuvitellaan pitkittäiskerroksia yhdistävinä mekaanisina liittiminä, joiden jäykkyys on niiden leikkausjäykkyyden suuruinen. Tästä syystä liitosten hyötysuhdekertoimien yhtälö (3) on muutettava muotoon

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 E_i A_i}{L^2} \frac{h_2}{G_R B} \right)}, \quad (4)$$

missä A_i lamellikerroksen i poikkileikkauksen pinta-ala [mm²],
 h_2 on poikittaiskerroksen paksuus [mm],
 G_R on poikittaiskerroksen vierintäliukumoduuli [N/mm²] ja
 B on poikkileikkauksen leveys [mm]. (Popovski et al. 2019, s. 119, 158–160)

Wallner-Novakin et al. (2014, s. 30) mukaan poikkileikkauksen tehollista taivutusjäykkyyttä laskettaessa annetaan poikittaiskerrosten kimmomoduulille arvo $E_{90} = 0$. Hyötysuhdekertoimien avulla laskettava poikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa saadaan silloin kaavalla (SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 106)

$$EI_{eff,0} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i d_i^2), \quad (5)$$

missä $EI_{eff,0}$ on poikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa [Nmm^2] ja I_i on lamellikerroksen i neliömomentti [mm^4].

Pitkittäiskerrosten kimmomoduulin E_0 ollessa vakio, saadaan poikkileikkauksen tehollinen neliömomentti pitkittäissuunnassa supistamalla edellä esitetty yhtälö (5) muotoon

$$I_{eff,0} = \sum_{i=1}^n (I_i + \gamma_i A_i d_i^2), \quad (6)$$

missä $I_{eff,0}$ on poikkileikkauksen tehollinen neliömomentti pitkittäissuunnassa [mm^4] (Wallner-Novak et al. 2014, s. 35).

Poikkileikkauksen pitkittäissuuntaista tehollista neliömomenttia käyttäen taivutusjännityksen mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{I_{eff,0}} (\gamma_1 d_1 + 0,5 h_1), \quad (7)$$

missä $\sigma_{m,d}$ on taivutusjännityksen mitoitusarvo [N/mm^2], M_d on momentin mitoitusarvo [Nmm], d_1 on etäisyys uloimman pitkittäislamellikerroksen keskipisteestä poikkileikkauksen painopisteeseen [mm] ja h_1 on uloimman pitkittäiskerroksen paksuus [mm] (Popovski et al. 2019, s. 160).

Poikkileikkauksen taivutuslujuuden mitoitusarvo on Wallner-Novak et al. (2014, s.53) mukaan

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{m,k} k_{sys}, \quad (8)$$

missä $f_{m,d}$ on taivutuslujuuden mitoitusarvo [N/mm^2],
 k_{mod} on käyttöluokkakerroin,
 γ_M on materiaaliosavarmuuskerroin,
 $f_{m,k}$ on taivutuslujuuden ominaisarvo [N/mm^2] ja
 k_{sys} on kuorman jakoluku.

Standardissa SFS-EN 1995-1-1 ei ole määritetty CLT-rakenteille käytettävää materiaaliosavarmuuskerrointa γ_M . Wallner-Novakin et al. (2014 s. 22) mukaan kyseiselle kertoimelle voidaan käyttää arvoa 1,25.

Käyttöluokkakertoimella k_{mod} otetaan huomioon rakenteen kosteuspitoisuus sekä siihen kohdistuvan kuormituksen kesto. Sen arvo määräytyy rakenteen käyttöluokan sekä kuorman aikaluokan mukaan. (SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 30) Käyttöluokkakertoimen arvot CLT-rakenteille käyttöluokissa 1 ja 2 on esitetty taulukossa 2. CLT-rakenteiden suunnittelu käyttöluokassa 3 ei ole sallittua viruman takia (Wallner-Novak et al. 2014, s. 29).

Taulukko 2. Käyttöluokkakerroin k_{mod} (mukaiillen SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 30)

Kuorman aikaluokka	Pysyvä kuorma	Pitkäaikainen kuorma	Keskipitkä kuorma	Lyhytaikainen kuorma	Hetkellinen kuorma
k_{mod}	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1

Kuorman jakoluvulla k_{sys} huomioidaan puolestaan kuorman jakautuminen lamellien välillä poikittaiskerrosten välityksellä, minkä ansiosta poikkileikkauksen taivutuskestävyyttä voidaan korottaa taulukon 3 mukaisilla kertoimilla (Wallner-Novak et al. 2014, s. 25, 26).

Taulukko 3. Kuorman jakoluku k_{sys} (mukaiillen SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 51)

Lamellien lukumäärä	1	2	3	4	5	6	7	8+
k_{sys}	1,000	1,029	1,057	1,086	1,114	1,143	1,171	1,200

Lopulta tarkastetaan, täyttääkö poikkileikkaus taivutuskestävyyden mitoitus ehdon

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}. \quad (9)$$

Yllä esitetyt yhtälöt soveltuvat vain symmetrisiin poikkileikkauksiin, joissa on enintään viisi lamellikerrosta. Mikäli lamellikerroksia on useampia, liitosten hyötysuhdekertoimet tulee ratkaista lineaarisella yhtälöryhmällä. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 182) Yhtälöryhmän ratkaisu suureineen on esitetty liitteessä 1.

Gamma-menetelmällä saadaan tarkat ratkaisut vain yksiaukkoisille, niveltuetuille rakenteille, joihin kohdistuu sinimuotoinen kuormitus. Se soveltuu kuitenkin myös tasaisesti tai pistemäisesti kuormitettujen rakenteiden laskentaan käytännön suunnittelutyössä, sillä saadut tulokset poikkeavat tarkasta ratkaisusta hyvin vähäisesti. Mikäli menetelmällä halutaan laskea kaksi- tai useampiaukkoisia rakenteita, voidaan laskennassa jännevälin mittana käyttää 0,8-kertaista todellista jänneväliä. Rakenteen toimiessa ulokkeena, tulee jännevälin mittana käyttää kaksinkertaista ulokkeen mittaa. (Popovski et al. 2019, s. 158, 159)

Menetelmä ei myöskään huomioi pitkittäiskerrosten leikkausmuodonmuutoksia, jonka takia sitä suositellaan käytettäväksi vain rakenteilla, joiden jännevälin ja paksuuden suhde L/H ylittää arvon 30. Toinen menetelmän heikkouksista on poikkileikkauksen pitkittäispuutteen tehollisen taivutusjäykkyyden $EI_{eff,0}$ riippuvuus rakenteen jännevälillä, minkä takia poikkileikkauksille ei voida määrittää systeemistä riippumattomia vakioarvoja. Näiden lisäksi liitosten hyötykertoimien γ_i laskenta monimutkaistuu huomattavasti käytettäessä poikkileikkauksia, joissa on yli viisi lamellikerrosta. (Popovski et al. 2019, s. 119, 159)

Wallner-Novakin et al. (2014, s. 13) mukaan Gamma-menetelmää voidaan käyttää murtorajatilassa huomioimatta liitosten hyötysuhdekertoimia. Tällöin poikittaiskerrosten leikkausmuodonmuutokset otettaisiin huomioon vain käyttörajatilan taipumamitoituksessa.

3.1.2 Leikkausanalogia

Blassin ja Fellmoserin (2004) tutkimuksessa todetaan, että parempi menetelmä CLT-rakenteiden taivutuskestävyyden mitoittamiseen on leikkausanalogia, toiselta nimeltään

Kreuzingerin menetelmä. Menetelmän käyttö ei rajoitu korkeintaan viisilamellisiin poikkileikkauksiin, eikä sillä saadut poikkileikkausarvot ole rakenteen jännevälistä riippuvaisia. Lisäksi myös pitkittäiskerrosten leikkausmuodonmuutokset huomioidaan. (Popovski et al. 2019, s. 167)

Poikkileikkaus jaetaan kahteen kuvitteelliseen palkkiin, joille annetaan nimet palkki A ja palkki B. Palkkeja yhdistää kuvitteelliset, äärettömän jäykät osat, joiden ansioista palkkien taipumat voidaan olettaa yhtä suuriksi. Palkin A jäykkyydeksi annetaan niin sanottu luonnollinen jäykkyys eli kerrosten jäykkyyksien summa ilman Steinerin säännön mukaista osuutta. Steinerin säännön osuus sekä kerrosten leikkausjäykkyydet puolestaan määrätään palkille B. (Popovski et al. 2019, s. 167)

Gamma-menetelmästä poiketen poikittaiskerrosten kimmomoduulille E_{90} annetaan nollasta poikkeava arvo. Murtorajatilassa palkille B annetaan vain Steinerin säännön osuus ja muut tekijät jätetään huomioimatta. Poikkileikkauksen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa murtorajatilassa on

$$EI_0 = EI_A + EI_B = \sum_{i=1}^n E_i \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i d_i^2, \quad (10)$$

missä EI_0 on poikkileikkauksen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa [Nmm^2].

Toisin kuin Gamma-menetelmässä, kimmomoduuli E_i ei ole vakio yllä esitetystä yhtälöstä (10), jolloin taivutusjäännitys tulee laskea kaavalla

$$\sigma_{m,d} = M_d \frac{H}{2} \frac{E_1}{EI_0}, \quad (11)$$

missä H on poikkileikkauksen kokonaiskorkeus [mm] ja E_1 on uloimman pitkittäiskerroksen kimmomoduuli [N/mm^2]. (Popovski et al. 2019, s. 168, 172)

Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo tulee laskea aiemmin Gamma-menetelmän yhteydessä esitetyn yhtälön (8) mukaan ja mitoitus suoritetaan niin ikään Gamma-menetelmän yhteydessä esitetyn mitoitus ehdon (9) mukaan.

3.2 Tasoa vastaan kohtisuora leikkaus

CLT-rakenteen leikkauskestävyyden tasoa vastaan kohtisuoraan kohdistuvassa leikkauksessa määrittää yleensä poikittaislamellin vierintäleikkauskestävyys. Poikkileikkauksen sisäisen tasapainoehdon vuoksi leikkausjännitys poikittaiskerroksissa oletetaan vakioksi. Vierintäleikkausjännityksen mitoitusarvo poikittaiskerroksessa on

$$\tau_{v,R,d} = \frac{V_d S_R}{I_0 B}, \quad (12)$$

missä $\tau_{v,R,d}$ on vierintäleikkausjännityksen mitoitusarvo poikittaiskerroksessa [N/mm²],
 V_d on leikkausvoiman mitoitusarvo [N],
 S_R on staattinen momentti [mm³] ja
 I_0 on pitkittäiskerrosten neliömomentti [mm⁴].

Staattisen momentin laskennassa huomioidaan vain pitkittäiskerrokset, ja niiden kimmomoduuli oletetaan vakioksi. Poikkileikkauksen staattinen momentti S_R lasketaan yhtälöllä

$$S_R = \sum_{i=1}^{n_L} B h_i d_i, \quad (13)$$

missä n_L poikkileikkauksen painopistettä lähimmän pitkittäiskerroksen järjestysnumero.

Poikkileikkauksen vierintäleikkauslujuuden mitoitusarvo saadaan kaavalla

$$f_{v,R,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,R,k}, \quad (14)$$

missä $f_{v,R,d}$ on vierintäleikkauslujuuden mitoitusarvo [N/mm²] ja
 $f_{v,R,k}$ on vierintäleikkauslujuuden ominaisarvo [N/mm²]. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 32, 56)

Poikkileikkauksen tulee täyttää vierintäleikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{v,R,d} \leq f_{v,R,d}. \quad (15)$$

Vierintäleikkauskestävyyden lisäksi tulee tarkistaa leikkauskestävyys pitkittäiskerroksessa, jonka leikkausjännitys lasketaan muuttamalla yhtälö 12 muotoon

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d S_0}{I_0 B}, \quad (16)$$

missä $\tau_{v,d}$ on leikkausjännityksen mitoitusarvo pitkittäiskerroksessa [N/mm^2] ja S_0 on staattinen momentti [mm^3].

Mikäli poikkileikkauksen painopiste sijaitsee pitkittäiskerroksessa, saadaan staattinen momentti kaavalla

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n_L} B h_i d_i + \frac{B h_n d_n}{2}, \quad (17)$$

missä h_n on poikkileikkauksen painopisteen sisältävän pitkittäiskerroksen paksuus [mm] ja d_n on poikkileikkauksen painopisteen sisältävän pitkittäiskerroksen keskipisteen etäisyys poikkileikkauksen painopisteestä [mm].

Poikkileikkauksen painopisteen sijaitessa poikittaiskerroksessa, tulee staattinen momentti S_0 laskea vastaavasti staattisen momentin S_R yhtälöllä (13). Pitkittäiskerroksen leikkauslujuuden mitoitusarvo on

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,0,k}, \quad (18)$$

missä $f_{v,d}$ on leikkauslujuuden mitoitusarvo [N/mm^2] ja $f_{v,0,k}$ on leikkauslujuuden ominaisarvo syysuunnassa [N/mm^2]. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 32, 56)

Rakenteen tulee täyttää pitkittäiskerrosten leikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d}. \quad (19)$$

3.3 Tason suuntainen leikkaus

CLT-levyjen kestävyyttä tason suuntaisille kuormille on toistaiseksi tutkittu suhteellisen vähän. Ristikkäin laminoitujen kerrosten takia rakenteen jännitystilojen määrittäminen on haastavaa, minkä takia tason suuntaisen leikkauskestävyyden laskennassa tulee suorittaa tarkastelut kolmen eri murtumismekanismin suhteen. Tutkimukset ovat osoittaneet, että CLT-levyn tason suuntainen leikkauskestävyys ei riipu ainoastaan materiaalin leikkauslujuudesta ja poikkileikkauksen bruttopinta-alasta, vaan siihen vaikuttaa näiden lisäksi myös kerrosten paksuuksien keskinäinen suhde sekä yksittäisten lamellien määrä ja poikkileikkausarvot. Kerrosten paksuudet ja lamellien määrät poikkileikkauksessa tunnetaan, mutta usein yksittäisten lamellien poikkileikkaukset varsinkin levyn aukkojen reunoilla jäävät huomioimatta. Mitoituksessa oletetaan, etteivät yksittäisten lamellien väliset reunat ole liimattuja, eikä niiden välillä ole kitkaa, jolloin leikkausvoimat siirtyvät vain kerrosten välisten liimasaumojen välityksellä. (Popovski et al. 2019, s. 135–139)

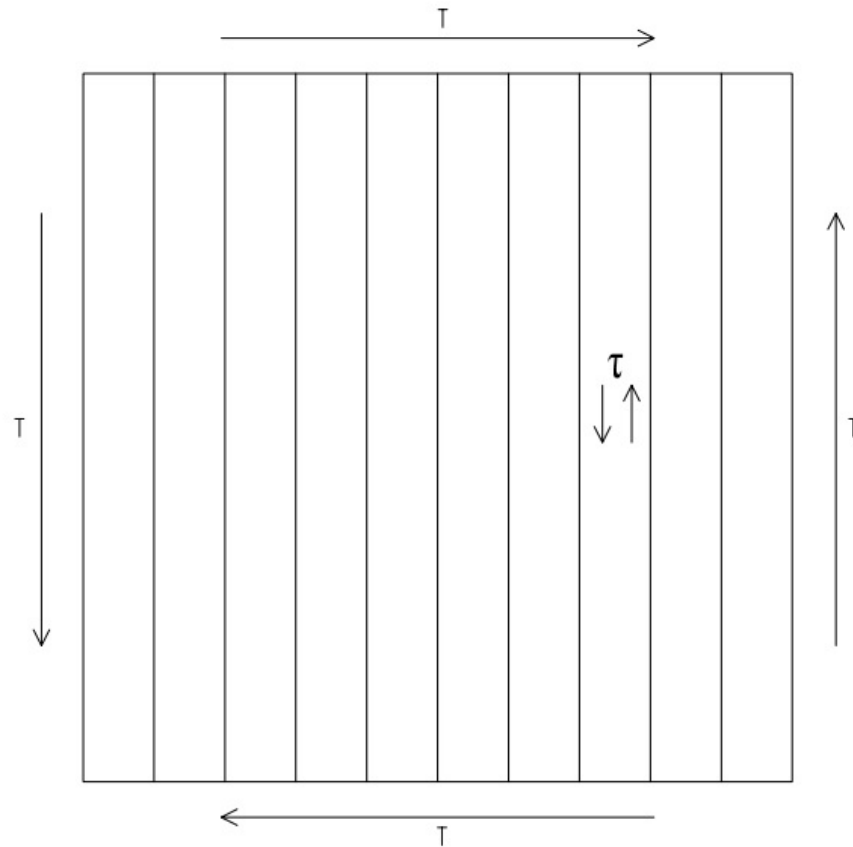
3.3.1 Paneelileikkauskestävyys

Ensimmäinen murtumismekanismi tarkastelee koko levyn leikkautumista eli niin kutsuttua paneelileikkausta. Leikkausjännitys oletetaan yhtä suureksi sekä pitkittäis- että poikittaisherroksissa ja leikkausmurtuminen tapahtuu syysuunnassa. (Popovski et al. 2019, s. 137)

Kuvassa 4 on esitetty koko levyyn kohdistuva syysuuntainen leikkausjännitys, joka saadaan yhtälöllä

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d}{A}, \quad (20)$$

missä $\tau_{v,d}$ on syysuuntaisen leikkausjännityksen mitoitusarvo [N/mm²],
 V_d on leikkausvoiman mitoitusarvo [N] ja
 A on poikkileikkauksen kokonaispinta-ala [mm²] (Wallner-Novak et al. 2014, s. 60).



Kuva 4. Koko levyyn kohdistuva, syysuuntainen leikkausjännitys (mukaillen Popovski et al. 2019, s. 137).

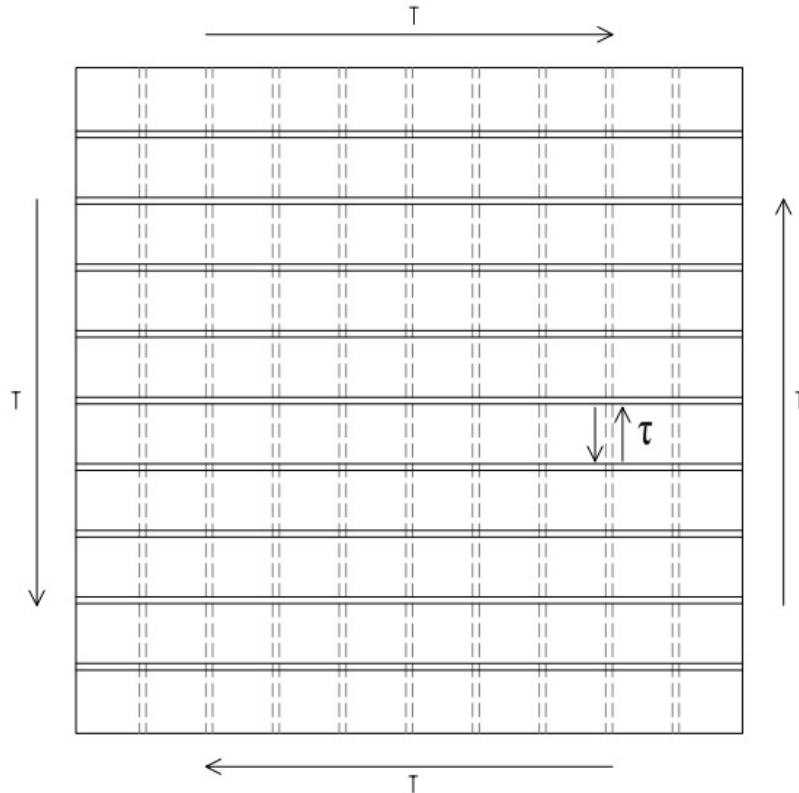
Leikkauskestävyyden mitoitusarvo syysuunnassa $f_{v,d}$ lasketaan pitkittäiskerrosten leikkauslujuuden yhtälöllä (18) ja mitoitus suoritetaan pitkittäiskerrosten leikkauskestävyyden mitoitus ehdon (19) mukaan.

3.3.2 Lamellileikkauskestävyys

Toinen murtumismekanismeista tarkastelee lamellin poikittaismurtumista, joka on esitetty kuvassa 5. Popovskin et al. (2019, s. 137) mukaan leikkausvoimat eivät siirry pitkittäissaumojen välityksellä, jolloin poikittaiskerroksiin syntyy pitkittäissaumojen kohdalle syysuuntaa vastaan kohtisuora leikkausjännitys. Se voidaan laskea kaavalla

$$\tau_{v,S,d} = \frac{V_d}{A_{net}}, \quad (21)$$

missä $\tau_{v,S,d}$ on leikkausjännityksen mitoitusarvo kohtisuoraa syysuuntaa vastaan [N/mm^2] ja A_{net} on pienempi arvo poikittais- ja pitkittäiskerrosten pinta-aloista [mm^2] (Wallner-Novak et al. 2014, s. 59).



Kuva 5. Poikittaiskerrokseen kohdistuva syysuuntaa vastaan kohtisuora leikkausjännitys (mukaillen Popovski et al. 2019, s. 137).

Wallner-Novakin et al. (2015, s. 59) mukaan rakenteen leikkauslujuuden mitoitusarvo lamellileikkauksessa on

$$f_{v,S,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,90,k}, \quad (22)$$

missä $f_{v,S,d}$ on lamellileikkauslujuuden mitoitusarvo [N/mm^2] ja $f_{v,90,k}$ on leikkauslujuuden ominaisarvo kohtisuoraan syysuuntaa vastaan [N/mm^2].

Rakenteen tulee täyttää lamellileikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{v,S,d} \leq f_{v,S,d}. \quad (23)$$

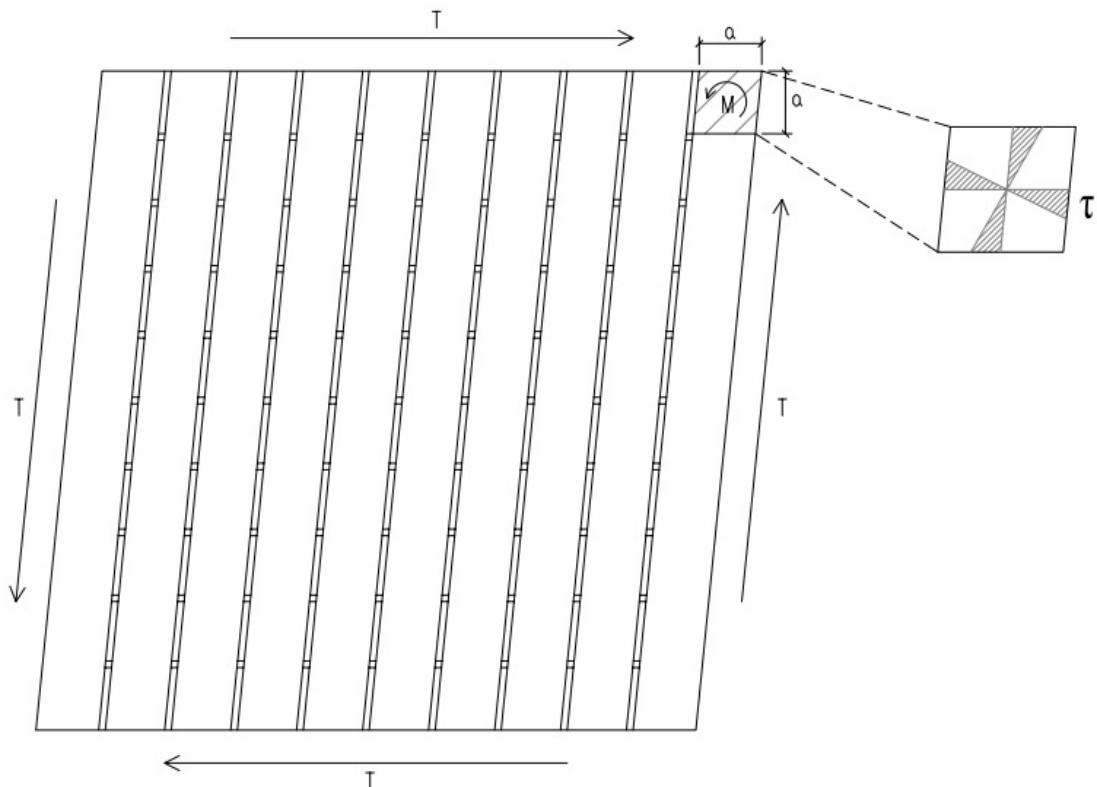
3.3.3 Lamellien kosketuspinnan vääntöleikkauskestävyys

Kolmas murtumismekanismi muodostuu lamellien kosketuspinnan välille, johon rakenteeseen kohdistuva leikkausvoima aiheuttaa vääntöjännityksen. Oletuksena on, että leikkausjännitykset ovat poikkileikkauksen paksuuden sekä rakenteen korkeuden suhteen vakioita, jolloin myös yksittäisten lamellien kosketuspinnan välille syntyvä vääntöjännitys on vakio koko rakenteessa. (Popovski et al. 2019, s. 143)

Kuvassa 6 esitetty lamellien kosketuspinnan vääntöjännitys on

$$\tau_{T,d} = \frac{3 V_d H_s}{n a^3}, \quad (24)$$

missä H_s on mitoitettavan rakenteen kokonaiskorkeus [mm],
 n on liimakerrosten kokonaismäärä rakenteessa ja
 a on yksittäisen lamellin leveys [mm] (Wallner-Novak et al. 2014, s. 59).



Kuva 6. Lamellien kosketuspinnan vääntöleikkausjännitys (mukaihen Wallner-Novak et al. 2014, s. 59).

Edellä esitetty yhtälö (24) pätee vain rakenteille, joissa kaikkien lamellien leveys on vakio. Mikäli lamellien leveys vaihtelee kerroksittain, tulee vääntöjännitys kertoa lamellien leveyden huomioivalla kertoimella

$$k_b = \frac{a_{max}}{a_0} \left(\frac{2a_0^2}{a_0^2 + a_{90}^2} \right), \quad (25)$$

missä k_b on lamellien leveyden huomioiva kerroin,
 a_{max} on rakenteen levein lamelli [mm],
 a_0 on pitkittäiskerrostien lamellien leveys [mm] ja
 a_{90} on poikittaiskerrostien lamellien leveys [mm]. (Popovski et al. 2019, s. 143)

Rakenteen vääntöleikkauskestävyys lasketaan yhtälöllä

$$f_{v,T,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,T,k}, \quad (26)$$

missä $f_{v,T,d}$ on vääntöleikkauslujuuden mitoitusarvo [N/mm^2] ja
 $f_{v,T,k}$ on vääntöleikkauslujuuden ominaisarvo [N/mm^2] (Wallner-Novak et al. 2014, s. 59).

Rakenteen tulee täyttää lamellien kosketuspinnan vääntöleikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{T,d} \leq f_{v,T,d}. \quad (27)$$

3.4 Puristuskestävyys pitkittäiskerrostien suunnassa

Pitkittäiskerrostien suuntaista puristuskestävyyttä määritettäessä voidaan huomioda vain kuorman suuntaiset pitkittäiskerrokset. Tällöin puristusjännitys pitkittäiskerroksissa saadaan yhtälöllä

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{0,d}}{B h_0}, \quad (28)$$

missä $\sigma_{c,0,d}$ on puristusjännityksen mitoitusarvo pitkittäiskerroksissa [N/mm^2],
 $N_{0,d}$ on pitkittäiskerrosten suuntaisen puristusvoiman mitoitusarvo [N] ja
 h_0 on kuorman suuntaisten lamellikerrosten yhteenlaskettu paksuus [mm].

Rakenteen syysuuntaisen puristuslujuuden mitoitusarvo on

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{c,0,k}, \quad (29)$$

missä $f_{c,0,d}$ on puristuslujuuden mitoitusarvo pitkittäissuunnassa [N/mm^2] ja
 $f_{c,0,k}$ on puristuslujuuden ominaisarvo syysuunnassa [N/mm^2]. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 49)

Rakenteen tulee täyttää syysuuntaisen puristuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}. \quad (30)$$

3.5 Puristuskestävyys kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan

Puristusjännitys kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan saadaan vastaavasti Wallner-Novakin et al. (2014, s.51) mukaan kaavalla

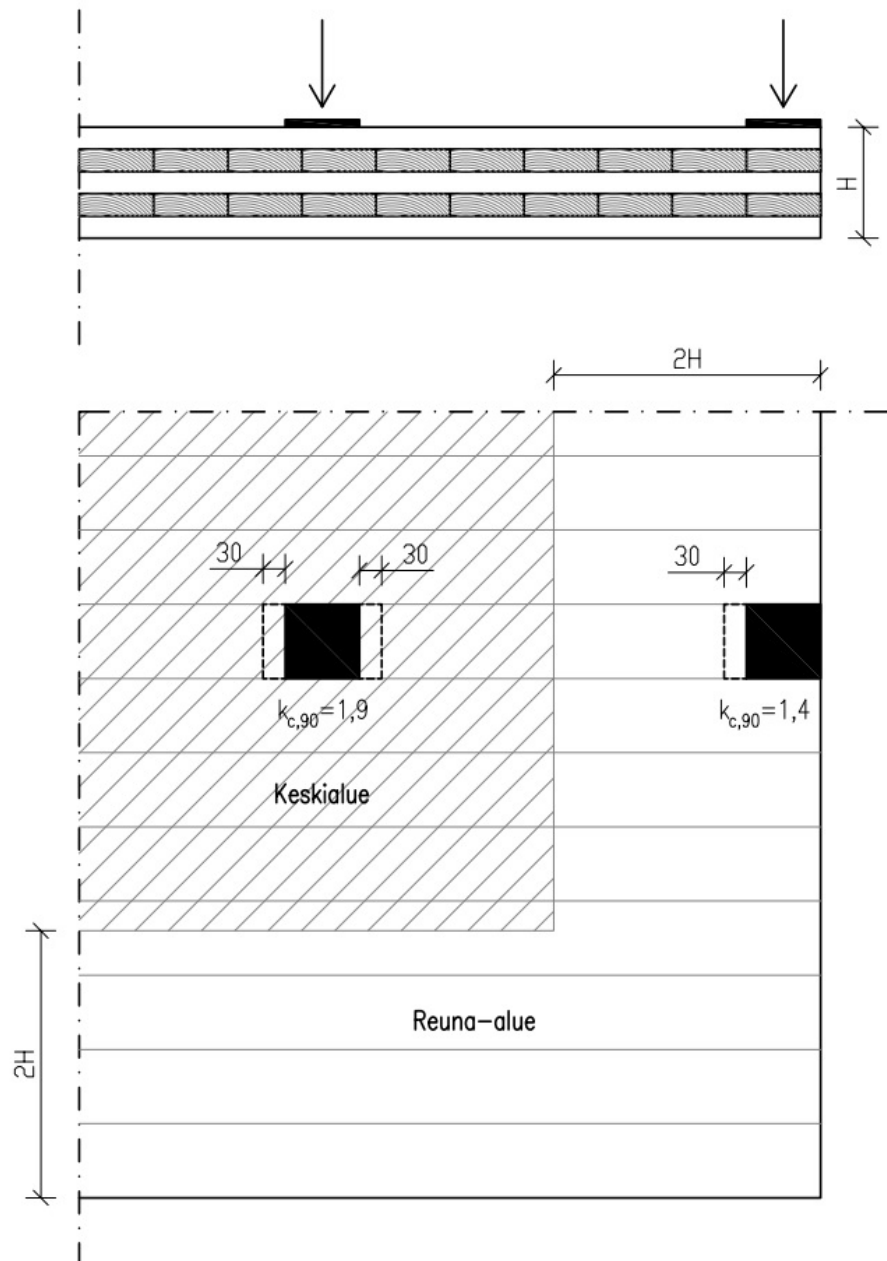
$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{90,d}}{k_{c,90} A_{eff}}, \quad (31)$$

missä $\sigma_{c,90,d}$ on puristusjännitys kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan [N/mm^2],
 $N_{90,d}$ on puristava voima kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan [N],
 $k_{c,90}$ on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman sijainti, halkeamismahdollisuus ja puristuman suuruus ja
 A_{eff} on rakenneosan tehollinen pinta-ala [mm^2].

Standardin SFS-EN 1995-1-1 (2014, s. 39) mukaan kerroin $k_{c,90}$ saa arvoja väliltä 1,0–1,75 riippuen rakenteen materiaalista, tuennoista sekä kuormituksen sijainnista. Lähteessä esitetään kuitenkin arvoja vain sahatavaralle sekä liimapuulle, eikä CLT-rakenteille sovellettavia arvoja mainita. Bogenspergerin et al. (2011, s. 1) tutkimuksessa todetaan, että CLT-rakenteen ristiinlaminoinnin ansiosta sen puristuskestävyys

pitkittäiskerroksia kohtisuoraan vastaan olevassa suunnassa on huomattavasti parempi kuin esimerkiksi liimapuun puristuskestävyys syysuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Tutkimuksessa ehdotetaan kertoimelle $k_{c,90}$ käytettävän arvoa 1,9 keskellä rakennetta ja 1,4 rakenteen reuna-alueella.

Tehollisen pinta-alan A_{eff} määrittämisessä todellista pinta-alaa voidaan lisäksi kasvattaa 30 millimetriä pitkittäiskerroksien suunnassa (Wallner-Novak et al. 2014, s. 51). Tehollisen pinta-alan sekä kertoimen $k_{c,90}$ määrittäminen on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Tehollisen pinta-alan määrittäminen sekä käytettävät $k_{c,90}$ arvot (mukaillen Wallner-Novak et al. 2014, s. 51).

Rakenteen puristuslujuuden mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan on

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{c,90,k}, \quad (32)$$

missä $f_{c,90,d}$ on rakenteen puristuslujuuden mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan [N/mm^2] ja $f_{c,90,k}$ on puristuslujuuden ominaisarvo kohtisuoraan syysuuntaa vastaan [N/mm^2] (Wallner-Novak et al. 2014, s. 51).

Rakenteen tulee täyttää kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan esiintyvän puristuksen mitoitusehto

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}. \quad (33)$$

3.6 Nurjahdus

CLT-rakenteen nurjahduskestävyyden laskentaan tulee soveltaa joko aiemmin esitettyä Gamma-menetelmää tai leikkausanalogiaa. Gamma-menetelmää käytettäessä laskenta etenee standardin SFS-EN 1995-1-1 nurjahduskestävyyden laskennan mukaisesti käyttäen kuitenkin tehollisia poikkileikkausarvoja, jolloin poikkitaikerojen leikkausjäykkyys huomioidaan. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 61) Leikkausanalogia huomioi tämän lisäksi myös pitkittäiskerojen leikkausjäykkyyden.

3.6.1 Gamma-menetelmä

Poikkileikkauksen suhteellinen hoikkuus mitoittavassa suunnassa lasketaan kaavalla

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (34)$$

missä λ_{rel} poikkileikkauksen suhteellinen hoikkuus mitoittavassa suunnassa, λ on taivutusta vastaava suhteellinen hoikkuus mitoittavassa suunnassa ja $E_{0,05}$ on viiden prosentin alemmaa fraktiilia vastaava, syysuuntaista kuormitusta vastaavan kimmomoduulin arvo [MPa] (SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 43).

Standardin SFS-EN 1995-1-1 liitteen C yhtälöstä C.3 poiketen taivutusta vastaavaa suhteellista hoikkuutta mitoitettavassa suunnassa laskettaessa CLT-poikkileikkaukselle, voidaan laskennassa ottaa huomioon vain tehollinen pinta-ala eli kuorman suuntaiset lamellikerrokset. Tällöin taivutusta vastaava suhteellinen hoikkuus lasketaan yhtälöllä

$$\lambda = L_E \sqrt{\frac{A_0}{I_{eff,0}}}, \quad (35)$$

missä L_E on rakenteen nurjahduspituus [mm],
 A_0 on kuorman suuntaisten lamellikerrosten pinta-ala [mm²] ja
 $I_{eff,0}$ on tehollinen neliömomentti pitkittäissuunnassa [mm⁴].

Suhteellisen hoikkuuden raja-arvona käytetään murtorajatilassa $\lambda \leq 150$ ja palotilanteessa $\lambda \leq 200$. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 61, 62) Rakenteen nurjahduspituus L_E riippuu puolestaan rakenteen tuentatavasta ja se määritetään taulukon 4 mukaisesti.

Taulukko 4. Nurjahduspituus L_E rakenteen pituuden ollessa L (mukaillen Ympäristöministeriö 2016, s. 11)

Tuentatapa	Nurjahduspituus L_E
Jäykästi kiinnitetty toisesta päästään ja nivelellisesti toisesta päästään, sivusiirtymätön rakenne	0,85 L
Nivelöity molemmista päistään	1,0 L
Poikittaistuettu nurjahduksen suunnassa välein a	1,0 a
Jäykästi kiinnitetty toisesta päästään ja vapaa toisesta päästään	2,5 L

Nurjahdukseen liittyvää epälineaarisuuskerrointa laskettaessa tulee ensin määrittää siihen liittyvä apusuure

$$k = 0,5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2), \quad (36)$$

missä k on epälineaarisuuteen liittyvä apusuure ja
 $\beta_c = 0,1$ on CLT-rakenteille käytettävä suoruuskerroin.

Nurjahdukseen liittyvä epälineaarisuuskerroin saadaan siten kaavalla

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \leq 1, \quad (37)$$

missä k_c on epälineaarisuuskerroin.

Nurjahduksen mitoitus ehdossa tarkistetaan taivuttavan ja puristavan voiman yhteisvaikutus. Mitoitusehdon yhtälö on

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (38)$$

missä $\sigma_{c,0,d}$ on puristusjännitys [N/mm^2] yhtälön 28 mukaisesti,
 $f_{c,0,d}$ on puristuslujuuden suunnitteluarvo [N/mm^2] yhtälön 29 mukaisesti,
 $\sigma_{m,d}$ on taivutusjännitys [N/mm^2] yhtälön 7 mukaisesti ja
 $f_{m,d}$ on taivutuslujuuden suunnitteluarvo [N/mm^2] yhtälön 8 mukaisesti.
(Wallner-Novak et al. 2014, s. 61, 62)

3.6.2 Leikkausanalogia

Popovskin et al. (2019, s. 132) esittämää leikkausanalogiaa käytettäessä rakenteen nurjahduskestävyyden mitoitusehto on vastaavasti

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \left[\frac{1}{1 - \frac{N_{0,d}}{N_{E,v}}} \right] \leq 1, \quad (39)$$

missä $N_{E,v}$ on leikkausmuodonmuutokset huomioiva Eulerin nurjahdusvoima [N].

Leikkausmuodonmuutokset huomioiva Eulerin nurjahdusvoima saadaan yhtälöllä

$$N_{E,v} = \frac{N_E}{1 + \frac{\kappa N_E}{GA_{eff}}}, \quad (40)$$

missä N_E on Eulerin nurjahdusvoima [N],
 κ on leikkauksen korjauskerroin ja
 GA_{eff} on tehollinen leikkausjäykkyys mitoittavassa suunnassa [N].

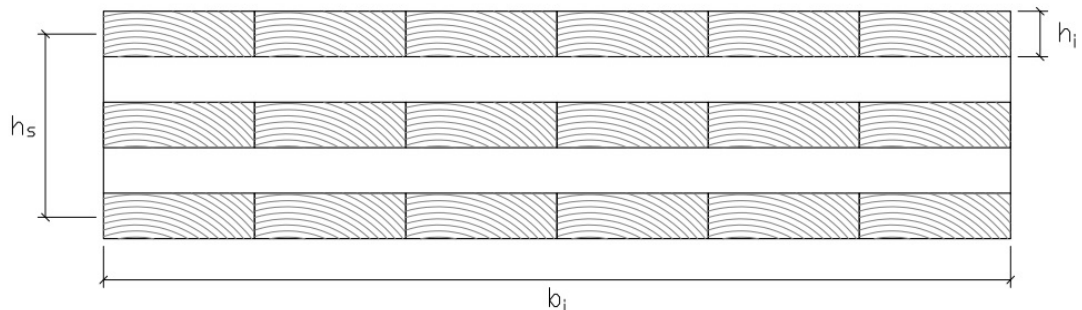
Leikkauksen korjauskertoimelle käytetään arvoa $\kappa=1,0$. Eulerin nurjahdusvoima saadaan puolestaan kaavalla

$$N_E = \frac{\pi^2 E_{0,05} I_0}{L_E^2}. \quad (41)$$

Tehollista leikkausjäykkyyttä laskettaessa huomioidaan sekä pitkittäis- että poikittaisherrokset, joille annetaan suunnastaan riippuen liukumoduulin arvo G_0 tai G_{90} . Kuvassa 8 on havainnollistettu laskennassa käytetyt merkinnät. Tehollinen leikkausjäykkyys GA_{eff} mitoitettavassa suunnassa lasketaan yhtälöllä

$$GA_{eff} = \frac{h_s^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2 G_1 b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2 G_n b} \right) \right]}, \quad (42)$$

missä h_s on uloimpien lamellikerrosten keskilinjojen välinen etäisyys [mm],
 G on kerroksen liukumoduuli [N/mm^2] ja
 b on lamellikerroksen leveys [mm]. (Popovski et al. 2019, s. 132, 133, 171)



Kuva 8. Tehollisen leikkausjäykkyyden GA_{eff} laskennassa käytetyt merkinnät.

3.7 Kiepahdus

CLT-rakennetta käytettäessä palkkina, se voi kiepahtaa yläreunastaan aukkojen kohdilla sekä alareunastaan tukien läheisyydessä eli niissä kohdissa, joissa esiintyy taivutuksesta aiheutuvia puristusjännityksiä. CLT-rakenteinen palkki tulee aina mahdollisuuksien mukaan tukea jatkuvasti esimerkiksi vaakarakenteella kiepahduksen estämiseksi, jolloin myöskään kiepahdustarkastelua ei tarvitse suorittaa. Mikäli palkkia ei ole ollenkaan tai

vain pistemäisesti kiepahdustuettu, tulee kiepahduskestävyys tarkistaa standardin SFS-EN 1995-1-1 kohdan 6.3.3 mukaisesti. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 64)

Kiepahduskestävyyden mitoituksessa käytetään tehollista jänneväliä L_{eff} , joka riippuu palkin tuentatavasta sekä kuormituksesta (SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 45). Tehollinen jänneväli määritetään taulukon 5 avulla.

Taulukko 5. Tehollisen jännevälin suhde todelliseen jänneväliin L_{eff}/L (mukaillen SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 45).

Palkin tuenta	Kuormituksen tyyppi	L_{eff}/L
Vapaasti tuettu	Vakiomomentti	1,0
	Tasaisesti jakautunut kuorma	0,9
	Pistekuorma jänteen keskellä	0,8
Uloke	Tasaisesti jakautunut kuorma	0,5
	Pistekuorma vapaassa päässä	0,8

Yllä esitetyt arvot ovat voimassa vain palkille, johon kuormitus vaikuttaa painopisteen korkeudella, ja joka ei pääse tuillaan kiertymään pituusakselinsa ympäri. Mikäli kuormitus vaikuttaa palkin puristetun reunan korkeudella, tulee tehollisen pituuden arvoa kasvattaa kaksi kertaa palkin korkeuden verran. Sitä voidaan vastaavasti pienentää 0,5-kertaisen korkeuden verran, mikäli kuormitus vaikuttaa vedetyn reunan korkeudella. (SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 45)

Kiepahduskestävyyden mitoituksessa määritetään ensin kriittinen taivutusjännitys, joka saadaan kaavalla

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{tor}}}{L_{eff} W_y}, \quad (43)$$

missä $\sigma_{m,crit}$ on kriittinen taivutusjännitys [N/mm^2],
 I_z on neliömomentti heikoimman z-akselin suhteen [mm^4],
 $G_{0,05}$ on viiden prosentin alemmaa fraktiilia vastaava, syysuuntaisessa tasossa syntyvää leikkausmuodonmuutosta vastaava liukukerroin [MPa],

I_{tor} on vääntöneliömomentti [mm^4],

L_{eff} on palkin tehollinen jänneväli [mm] ja

W_y on taivutusvastus y-akselin suhteen [mm^4] (SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 44).

Sillyn (2010) diplomityössä todetaan, että CLT-rakenteille voidaan suunnittelussa käyttää vääntöneliömomentille arvoa

$$I_{tor} = 0,65 c_1 \frac{B^3 H}{3}, \quad (44)$$

missä apukerroin

$$c_1 = 1 - 0,63 \frac{B}{H} + 0,052 \left(\frac{B}{H} \right)^5. \quad (45)$$

Taivutusvastusta vahvemman akselin suhteen laskettaessa huomioidaan kuvan 9 mukaisesti pitkittäiset, jännevälin suuntaiset kerrokset, ja se lasketaan yhtälöllä

$$W_y = \frac{I_y}{\max \{|z_o|; |z_u|\}}, \quad (46)$$

missä I_y on neliömomentti y-akselin suhteen [mm^4],

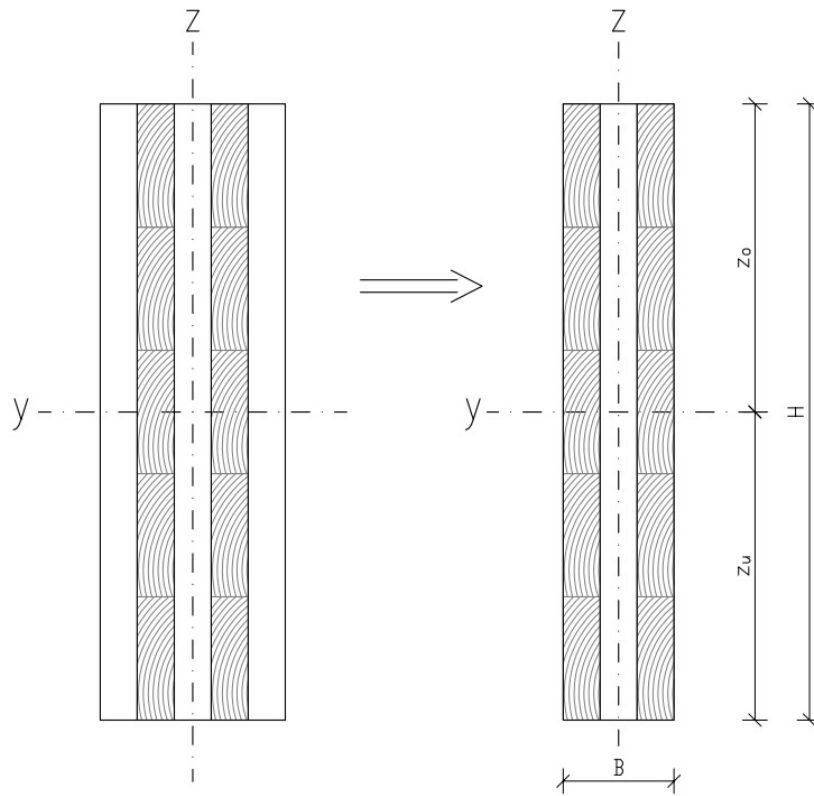
z_o on poikkileikkauksen painopisteen etäisyys poikkileikkauksen yläreunasta [mm] ja

z_u on poikkileikkauksen painopisteen etäisyys poikkileikkauksen alareunasta [mm]. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 31, 33)

Kriittisen taivutusjännityksen avulla määritetään palkin suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}, \quad (47)$$

missä $\lambda_{rel,m}$ on suhteellinen hoikkuus (SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 44).



Kuva 9. CLT-palkin kiepahduksen laskennassa käytetyt merkinnät.

Suhteellisesta hoikkeudesta riippuvan kertoimen k_{crit} avulla otetaan huomioon kiepahdusriskin takia pienentynyt taivutuskestävyys (SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 44). Kyseinen kerroin määritetään taulukon 6 mukaan.

Taulukko 6. Kerroin k_{crit} (mukaillen SFS-EN 1995-1-1 2014, s. 45)

$\lambda_{rel,m}$	k_{crit}
$\lambda_{rel,m} \leq 0,75$	1
$0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4$	$1,56 - 0,75 \lambda_{rel,m}$
$1,4 < \lambda_{rel,m}$	$1 / \lambda_{rel,m}^2$

Rakenteen tulee täyttää standardin SFS-EN 1995-1-1 (2014, s. 44) mukainen mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d}. \quad (48)$$

4 KÄYTTÖRAJATILA

Käyttörajatiloiksi luokitellaan ne rajatilat, jotka liittyvät rakenteen tai rakenneosien toimintaan normaalissa käytössä, vaikuttavat käyttäjien mukavuuteen tai kohteen ulkonäköön. Käyttörajatilatarkastelussa tulee tarkastaa rakenteelle asetetut taipuma- ja värähtelykriteerit. (SFS-EN 1990 2006, s. 56). Tässä luvussa esitetään eri menetelmiä, joilla voidaan todentaa näiden kriteerien täyttyminen.

4.1 Taipuma

Rakenteen taipumaa tulee rajoittaa sekä käytännöllisistä että ulkonäkösyistä. Suomessa taipuman raja-arvoina käytetään pääkannattimille $L/400$ hetkellisen taipuman ja $L/300$ lopullisen taipuman suhteen (Ympäristöministeriö 2016, s. 13).

4.1.1 Gamma-menetelmä

Taipumaa laskettaessa Gamma-menetelmällä poikittaiskerrosten leikkausmuodonmuutos otetaan huomioon käyttämällä tehollista taivutusjäykkyyttä. Yksiaukkoisella rakenteella pysyvän ja tasaisesti jakautuneen kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma on

$$w_{inst,g} = \frac{5 g_k L^4}{384 E I_{eff,0}}, \quad (49)$$

missä $w_{inst,g}$ on pysyvän kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma [mm],
 g_k on pysyvän kuorman ominaisarvo [N/mm] ja
 $E I_{eff,0}$ on yhtälön 5 mukainen poikkileikkauksen taivutusjäykkyys [Nmm^2].

Vastaavasti tasaisesti jakautuneen muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma lasketaan kaavalla

$$w_{inst,q} = \frac{5 q_k L^4}{384 E I_{eff,0}}, \quad (50)$$

missä $w_{inst,q}$ on muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma [mm] ja
 q_k on muuttuvan kuorman ominaisarvo [N/mm].

Laskemalla yhteen pysyvän ja muuttuvan kuorman aiheuttamat hetkelliset taipumat, saadaan hetkellinen kokonaistaipuma

$$w_{inst} = w_{inst,g} + w_{inst,q}, \quad (51)$$

missä w_{inst} on hetkellinen kokonaistaipuma [mm].

Rakenteen viruman huomioiva lopputilan taipuma saadaan puolestaan kaavalla

$$w_{fin} = w_{inst,g} (1 + k_{def}) + w_{inst,q} (1 + \psi_2 k_{def}), \quad (52)$$

missä w_{fin} on lopputilan taipuma [mm],

k_{def} on virumaluku ja

ψ_2 on muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 168)

Virumaluvun arvona voidaan CLT-rakenteille käyttää taulukon 7 mukaisia arvoja. Viruman takia CLT-rakenteita ei saa suunnitella käyttöluokassa 3 (Wallner-Novak et al. 2014, s. 29).

Taulukko 7. Virumaluku k_{def} CLT-rakenteille (mukaillen Wallner-Novak et al. 2014, s. 29)

Käyttöluokka	k_{def}
1	0,8
2	1
3	Ei sallittu

4.1.2 Leikkausanalogia

Popovskin et al. (2019, s.145) mukaan leikkausanalogia huomioi sekä pitkittäis- että poikittaisherrosten leikkausmuodonmuutokset. Pysyvän ja tasaisesti jakautuneen kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma menetelmän mukaan on

$$w_{inst,g} = \frac{5 g_k L^4}{384 EI_0} + \frac{g_k L^2}{8 GA_{eff}}, \quad (53)$$

missä EI_0 on yhtälön 10 mukainen poikkileikkauksen taivutusjäykkyys [Nmm^2].

Vastaavasti muuttuvan kuorman aiheuttama hetkellinen taipuma saadaan yhtälöllä

$$w_{inst,q} = \frac{5 q_k L^4}{384 EI_0} + \frac{q_k L^2}{8 GA_{eff}}. \quad (54)$$

Lopputilan taipuma lasketaan Gamma-menetelmän yhteydessä esitetyllä yhtälöllä 52.

4.2 Värähtely

Värähtelymitoituksen tarkoituksena on varmistaa, etteivät rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset aiheuta rakennuksen käytön kannalta haitallista värähtelyä tai epämukavuutta käyttäjille. Rakenteen värähtelyyn liittyvistä ominaisuuksista tärkeimpiä ovat alin ominaistajuus, rakenteen jäykkyys sekä vaimennusominaisuudet. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 75)

Kävelevän henkilön aiheuttama kuormitus voi aiheuttaa rakenteessa kahden tyyppistä värähtelyä, joita ovat lyhyet, iskumaiset värähtelyt sekä rakenteen jaksottainen värähtely eli resonointi. Rakenteen ominaistajuuden ollessa yli 8 Hz, määräävänä värähtelymuotona ovat hyvin todennäköisesti iskumaiset värähtelyt. Ominaisajuuden ollessa puolestaan alle 8 Hz, määrääväksi värähtelymuodoksi voi muodostua rakenteen resonointi, jonka ihminen havaitsee yleensä kaikista haitallisimmaksi värähtelyksi. Rakenteen resonointi on suurimmillaan noin 2 Hz ominaistajuudella, joka on henkilön kävelystä aiheutuvan kuormituksen tyypillinen taajuus. (Hu et al. 2019, s. 348)

Värähtelyn monimuotoisuuden vuoksi värähtelymitoitukseen ei ole vain yhtä tiettyä menetelmää, jolla se tulisi suorittaa, joten tässä luvussa esitetään kolme vaihtoehtoa sen suorittamiseen CLT-rakenteille. Nämä menetelmät ovat standardin SFS-EN 1995-1-1 Suomen kansallisen liitteen menetelmä sovellettuna CLT-rakenteille, Wallner-Novak et al. -menetelmä sekä Canadian CLT Handbookin menetelmä.

4.2.1 Suomen kansallisen liitteen menetelmä

SFS-EN 1995-1-1 Suomen kansallisen liitteen mukainen menetelmä korvaa täysin standardin SFS-EN 1995-1-1 kohdassa 7.3.3 esitetyn menetelmän. Rakenteen alin ominaistajuus f_1 tulee olla yli 9 Hz sekä 1 kN pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma δ korkeintaan 0,5 mm. (Ympäristöministeriö 2016, s. 18) Rakenteen ominaistajuuden ollessa alle 9 Hz tulee suorittaa erityistarkastelu, jota ei kuitenkaan menetelmässä esitetä. Menetelmä on tarkoitettu palkkirakenteisille lattioille, joten menetelmää sovellettaessa CLT-rakenteille tulee rakenteen taivutusjäykkyytenä käyttää Gamma-menetelmän yhteydessä esitettyä tehollista taivutusjäykkyyttä $EI_{eff,0}$.

Lattiarakenteen alin ominaistajuus voidaan määrittää yhtälöllä

$$f_1 = \frac{\pi}{2 L^2} \sqrt{\frac{EI_{eff,0}}{m_q}}, \quad (55)$$

missä f_1 on rakenteen alin ominaistajuus [Hz],
 L on jänneväli [m],
 $EI_{eff,0}$ on tehollinen taivutusjäykkyys jännevälin suunnassa [Nm^2] ja
 m_q on rakenteen massa pinta-alayksikköä kohden ja hyötykuormasta 30 kg/m^2 yhteen laskettu massa [kg/m^2].

Värähtelymitoituksessa voidaan huomioida rakenteen poikittaissuuntainen jäykkyys sekä mahdollisten pintarakenteiden kuten betonivalun jäykkyys. Mikäli poikittaissuuntainen jäykkyys huomioidaan, tulee liitosten hyötysuhdekertoimien γ_i laskennassa käyttää jännevälinä levyn todellista leveyttä. Tällöin muutetaan yllä esitetty yhtälö muotoon

$$f_1 = \frac{\pi}{2 L^2} \sqrt{\frac{EI_{eff,0}}{m_q}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{L}{B_h} \right)^2 + \left(\frac{L}{B_h} \right)^4 \right] \frac{EI_{eff,90}}{EI_{eff,0}}}, \quad (56)$$

missä B_h on lattiarakenteen leveys poikittaissuunnassa [m] ja
 $EI_{eff,90}$ on taivutusjäykkyys rakenteen poikittaissuunnassa [Nm^2].

Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma on

$$\delta = \min \begin{cases} \delta = \frac{F L^2}{42 k_\delta EI_{eff,0}} k_L \\ \delta = \frac{F L^3}{48 B EI_{eff,0}} k_L \end{cases}, \quad (57)$$

missä δ on pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma [mm],
 $F = 1$ kN, on poikkileikkauksen kohdalla sijaitseva pistekuorma,
 k_δ on poikittaisjäykkyyden huomioiva kerroin ja
 k_L on huoneen koosta riippuva taipumarajoituksen korotuskerroin.
 (Ympäristöministeriö 2016, s.18, 19)

Huoneen koosta riippuva taipumarajoituksen korotuskerroin saadaan yhtälöllä

$$k_L = \frac{1}{0,318 + 0,114 L_1} \geq 1, \quad (58)$$

missä L_1 on huoneen suurin sivumitta [m] (Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL ry 2017, s. 100).

Ympäristöministeriön (2016, s.19) mukaan rakenteen poikittaisjäykkyyden huomioiva apukerroin lasketaan kaavalla

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{EI_{eff,90}}{EI_{eff,0}}} \leq \frac{B_h}{L}. \quad (59)$$

4.2.2 Wallner-Novak et al. -menetelmä

Wallner-Novakin et al. (2014, s.80) esittämä värähtelyn mitoitusmenetelmä perustuu niin ikään rakenteen ominaistaajuuden sekä pistekuorman aiheuttaman hetkellisen taipuman rajoittamiseen. Rakenteen ominaistaajuuden vaatimuksen alittaminen voidaan hyväksyä, mikäli rakenne täyttää kiihtyvyyden vaatimuksen sekä ominaistaajuuden ehdottoman alarajan 4,5 Hz. Edellä esitetyn Suomen kansallisen liitteen mukaiseen menetelmään poiketen rakenteet jaetaan kolmeen eri värähtelyluokkaan taulukon 8 mukaisesti.

Taulukko 8. Rakenteiden värähtelyluokat (mukaillen Wallner-Novak et al. 2014, s. 81)

	1. luokka	2. luokka	3. luokka
Ominaistaajuusvaatimus	$f_1 \geq 8 \text{ Hz}$	$f_1 \geq 6 \text{ Hz}$	-
Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma	$\delta \leq 0,25 \text{ mm}$	$\delta \leq 0,50 \text{ mm}$	-
Kiihtyvyyden vaatimus	$a_{\text{rms}} \leq 0,05 \text{ m/s}^2$ lisäksi $f_1 \geq 4,5 \text{ Hz}$	$a_{\text{rms}} \leq 0,10 \text{ m/s}^2$ lisäksi $f_1 \geq 4,5 \text{ Hz}$	-
Tyypillisiä rakenteita	Välipohjat eri tilojen välillä, esimerkiksi asuinkerrostalot ja toimistot	Asumnon sisäiset välipohjat	Yläpohjat ja välipohjat, joilla ei värähtelyvaatimuksia

Menetelmää käytettäessä tulee rakenteen taivutusjäykkyytenä käyttää pitkittäiskerrostien suuntaista taivutusjäykkyyttä EI_0 , jossa ei oteta huomioon poikittaiskerrostien leikkausjäykkyyttä. Rakenteen alin ominaistaajuus yhteen suuntaan kantavilla rakenteilla saadaan silloin yhtälöllä

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI_0}{m_0}}, \quad (60)$$

missä EI_0 on taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa [Nm^2] ja m_0 rakenteen massa pinta-alayksikköä kohden [kg/m^2].

Mahdolliset pintakerrokset, kuten betonivalut, voidaan huomioida rakenteen taivutusjäykkyydessä. Sen sijaan CLT-rakenteen poikittaisjäykkyys voidaan huomioida vain kahteen suuntaan kantavilla rakenteilla. Kahteen suuntaan kantavien rakenteiden alin ominaistaajuus saadaan muuttamalla edellä esitetty yhtälö (60) muotoon

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI_0}{m_0} \sqrt{1 + \left(\frac{L}{B_h}\right)^4 \frac{EI_{90}}{EI_0}}}, \quad (61)$$

missä EI_{90} on taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa [Nm^2].

Pistekuorman aiheuttamaa hetkellistä taipumaa laskettaessa poikittainen jäykkyys sekä yhteen että kahteen suuntaan kantavilla rakenteilla huomioidaan käyttämällä tehollista leveyttä b_{eff} , jolloin pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma lasketaan yhtälöllä

$$\delta = \frac{F L^3}{48 EI_0 b_{eff}}, \quad (62)$$

missä b_{eff} on rakenteen tehollinen leveys [m].

Tehollinen leveys voidaan laskea vastaavasti kaavalla

$$b_{eff} = \min \left\{ \frac{L}{1,1} \sqrt[4]{\frac{EI_{90}}{EI_0}}; B_h \right\}, \quad (63)$$

missä L on rakenteen jänneväli [m]. (Wallner-Novak et al. 2018, s. 22, 23)

Rakenteen ominaistaajuuden ollessa alle värähtelyluokkansa vaatimuksen, voidaan sen värähtelyominaisuudet silti katsoa riittäviksi, mikäli se alittaa värähtelyluokkansa mukaisen kiihtyvyyden raja-arvon. Kiihtyvyyden rakenteeseen aiheuttaa henkilön kävelystä syntyvä kuormitus, jonka arvona voidaan käyttää 700 N. Henkilön kävelystä rakenteeseen syntyvä kiihtyvyys lasketaan kaavalla

$$a_{rms} = \frac{0,4 a_f F_0}{M 2 D} \quad (64)$$

missä a_{rms} on henkilön kävelystä rakenteeseen syntyvä kiihtyvyys [m/s^2],

a_f on ominaistaajuuden huomioiva kerroin,

$F_0 = 700$ N on kävelevän henkilön aiheuttama kuorma,

M on modaalimassa [kg] ja

D on vaimennuskerroin (Wallner-Novak et al. 2018, s. 23).

Wallner-Novakin et al. (2018, s. 9, 23) mukaan ominaistaajuuden huomioiva kerroin on

$$a_f = e^{-0,40 f_1} \quad (65)$$

ja modaalimassa on puolestaan se kokonaismassan osa, joka aktivoituu tietyn värähtelytilan seurauksena, ja se saadaan yhtälöllä

$$M = m_0 \frac{L}{2} b_{eff}. \quad (66)$$

Vaimennuskertoimen D arvo riippuu käytettävästä pintarakenteesta. Jos käytetään vain kevyttä pintarakennetta tai ei pintarakennetta ollenkaan, käytetään vaimennuskertoimen arvoa 0,025. Vastaavasti kelluvilla pintarakenteilla käytetään vaimennuskertoimen arvoa 0,04. (Wallner-Novak et al. 2018, s. 19)

4.2.3 Canadian CLT Handbook

Hun et al. (2019, s. 346) mukaan CLT-levyn värähtelyominaisuudet poikkeavat perinteiseen palkkirakenteeseen merkittävästi, jonka takia palkkirakenteiden laskentamenetelmät eivät sovellu CLT-rakenteille. Lattiarakenne koostuu tyypillisesti useasta CLT-levystä, joiden väliset saumat ovat niveliä. Saumojen jäykkyys suhteessa levyn poikittaissuunnan jäykkyyteen on pieni, jolloin CLT-rakenteen värähtelymitoitus tulee suorittaa yhteen suuntaan kantavana rakenteena, huomioimatta poikittaisherrosten jäykkyyttä.

Aiemmin esitetyistä menetelmistä poiketen, ehdotettu laskentamenetelmä ei perustu ominaistaajuuden, hetkellisen taipuman tai kiihtyvyyden raja-arvojen määrittämiseen. Menetelmän mukaan kaikki edellä mainitut määreet ovat riippuvaisia rakenteen massasta ja jäykkyydestä, joiden suhteen avulla voidaan määrittää rakenteen suurin sallittu jänneväli, joka lasketaan kaavalla

$$L \leq 0,11 \frac{EI_0^{0,29}}{m^{0,12}}, \quad (67)$$

missä L on rakenteen suurin sallittu jänneväli [mm],
 EI₀ on CLT-levyn taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa [Nmm²] ja
 m on rakenteen massa [kg/m].

Kaksi- tai useampiaukkoisilla rakenteilla sallittua jänneväliä voidaan kasvattaa korkeintaan 20 % ottamalla huomioon kevyet väliseinät, lattiamateriaalit ja katon alaslaskut. Tällöin jännevälin maksimi tulee kuitenkin rajoittaa 8 metriin. CLT-rakenteen päälle tulevat kerrokset, kuten betonivalu, jätetään mitoituksessa huomioimatta, mikäli sen neliöpaino on alle kaksikertainen CLT-rakenteeseen verrattuna. Neliöpainon ollessa yli kaksinkertainen CLT:n painoon verrattuna, tulee sallittua jänneväliä pienentää 10 %. Näiden kerrosten painoa tai jäykkyyttä ei siis huomioida edellä esitetyn yhtälön (67) termeissä. (Hu et al. 2019, s. 323, 349)

Suurin sallittu jänneväli edellyttää, että rakenteen tuet ovat riittävän jäykät. Tuen jäykkyydellä tässä yhteydessä tarkoitetaan tukevan rakenneosan taivutusjäykkyyttä, eikä liitoksen staattista mallia. Rakenteen tukeutuessa kantavan seinän varaan, katsotaan tuen jäykkyys riittäväksi. Mikäli rakenne tuetaan palkin varaan, tulee palkilta vaadittava taivutusjäykkyys laskea yhtälöllä

$$EI_p \geq F_s 132,17 L_p^{6,55}, \quad (68)$$

missä EI_p on palkilta vaadittava taivutusjäykkyys [Nm^2],
 L_p on palkin jänneväli [m] ja
 F_s on staattisen mallin huomioiva kerroin.

Kertoimelle F_s käytetään arvoa 1,0 yksiaukkoisille rakenteille. Vastaavasti kaksi- tai useampiaukkoisille palkeille voidaan käyttää arvoa 0,7. (Hu et al. 2019, s. 332, 333)

5 CLT:N PALOMITOITUS

Puurakenteet voidaan eurokoodin mukaan palotilanteessa mitoittaa kolmella eri periaatteella. Puurakenne voi olla kokonaan suojattu palolta vaaditun palonkestoajan, jolloin mitoitus tehdään alkuperäisen poikkileikkauksen arvoilla olettaen, ettei rakenne hiilly. Rakenne voi olla myös suojattu palolta vain osan vaaditusta palonkestoajasta tai täysin suojaamaton, jolloin rakenne hiiltyy palon seurauksena. Tällöin rakenteen kantavuuden mitoituksessa voidaan käyttää vain jäljelle jäävää, hiiltymätöntä poikkileikkausta. Oleellista puurakenteiden mitoituksessa on hiiltymisen alkamisajankohdan sekä hiiltymisnopeuden tunteminen. Puurakenteen hiiltymisnopeus määräytyy tyypillisesti käytetyn materiaalin sekä palolle altistuneiden pintojen mukaan. Yksidimensionaalista hiiltymisnopeutta käytetään rakenteen yhden sivun altistuessa ja nimellistä hiiltymisnopeutta useamman kuin yhden sivun altistuessa palolle. (Lahtela 2018, s. 80)

CLT-rakenteiden palomitoitukselle ei tällä hetkellä ole yleisesti hyväksyttyjä menetelmiä, vaan käytännön mitoitus perustuu valmistajakohtaisiin menetelmiin. CLT-rakenteille ominainen ilmiö hiiltymisen seurauksena on niin sanottu delaminoituminen, joka tarkoittaa palolle altistuneen, hiiltyneen kerroksen irtoamista rakenteesta. Delaminoituminen tapahtuu palon saavuttaessa lamellikerrosten välisen liimasauaman ja sen seurauksena irronneen lamellikerroksen takaa paljastuva kerros hiiltyy suuremmalla nopeudella, sillä sen lämpötila on kohonnut jo ennen hiiltymisen alkamista. (Lahtela 2018, s. 92)

Laskennallisen hiiltymissyvyyden lisäksi tulee huomioida hiiltymättömän osan pintakerros, jolla on heikommat lujuus- ja jäykkyysominaisuudet lämpötilan nousun takia. Hiiltymisen ja lämpötilan nousun takia lujuutensa ja jäykkyytensä menettäneen kerroksen huomioon ottamiseen voidaan käyttää kahta eri menetelmää, tehollisen poikkileikkauksen menetelmää tai alennettujen materiaaliarvojen menetelmää, joista suositeltavaa on käyttää ensin mainittua. Teoreettinen lujuuden ja jäykkyyden menettänyt kerros saadaan kaavalla

$$d_{eff} = d_{char,0} + k_0 d_0, \quad (69)$$

missä d_{eff} on teoreettinen lujuuden ja jäykkyyden menettänyt kerros [mm],
 $d_{char,0}$ on hiiltemissyvyyden suunnitteluvarvo [mm],
 k_0 on palolle altistuneen ajan huomioiva kerroin ja
 d_0 on lämmön nousun takia lujuuden ja jäykkyyden menettäneen kerroksen paksuus [mm].

Lämmön nousun takia lujuuden ja jäykkyyden menettäneelle kerrokselle d_0 tulee käyttää perusarvoa 7 mm. Rakenteen palolle altistuneen ajan huomioiva kerroin saadaan puolestaan yhtälöstä

$$k_0 = \begin{cases} \frac{t}{20} & \text{jos } t < 20 \text{ min} \\ 1 & \text{jos } t \geq 20 \text{ min} \end{cases}, \quad (70)$$

missä t on aika, jonka rakenne on altistunut palolle [min].

Hiiltemissyvyyden suunnitteluvarvo palosuojaamattomalle rakenteelle on

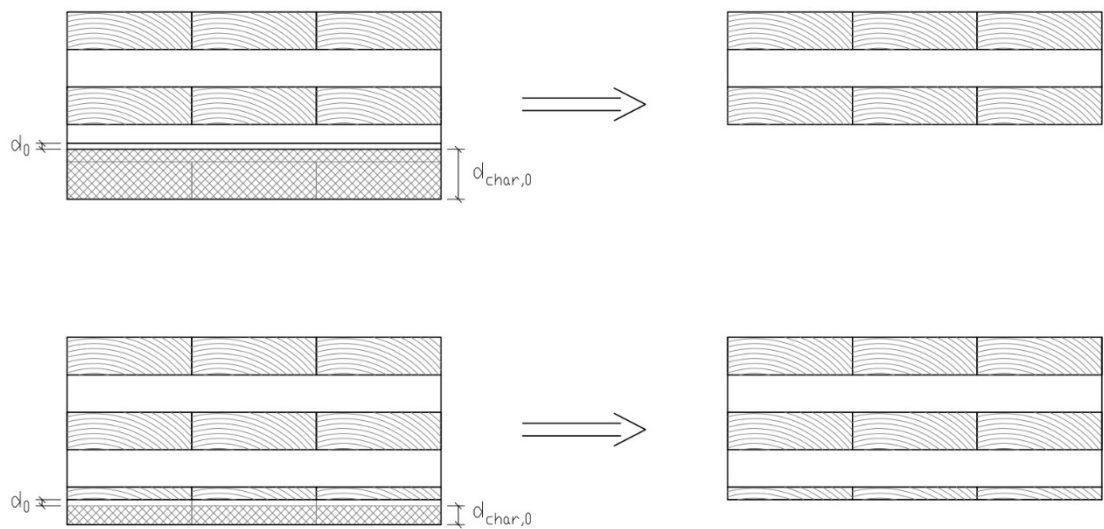
$$d_{char,0} = \beta_0 t, \quad (71)$$

missä β_0 on hiiltemisnopeus [mm/min]. (Stora Enso 2016, s. 23)

Palosuojaamattomalle CLT-rakenteelle hiiltemisnopeus ensimmäisessä lamellikerroksessa on vakio 0,65 mm/min. Pystyrakenteilla hiiltemisen saavuttaessa toisen lamellikerroksen, tulee siitä hetkestä eteenpäin käyttää korotettua arvoa 0,86 mm/min kaikille jäljellä oleville lamellikerroksille. Vaakarakenteilla hiiltemisen saavuttaessa toisen lamellikerroksen, tulee mahdollinen delaminoituminen ottaa huomioon. Tällöin hiiltemisnopeudelle tulee käyttää kaksinkertaista arvoa eli 1,3 mm/min ensimmäisen 25 millimetrin osalta. Hiiltemisen edetessä yli 25 millimetriin, voidaan olettaa hiiltemyneen osan suojaavan hiiltemätöntä rakennetta, jolloin voidaan käyttää jälleen vakioarvoa 0,65 mm/min. Hiiltemisen edetessä edelleen seuraavaan lamellikerrokseen, tulee jälleen käyttää kaksinkertaista arvoa samojen, edellä mainittujen sääntöjen mukaisesti. (Wallner-Novak et al. 2014, s. 92) Rakenteen hiiltemiseen voidaan vaikuttaa palosuojaamalla rakenne, jolloin hiiltemisnopeus sekä hiiltemisen

alkamisajankohta ovat palosuojauksesta riippuvaisia. Tässä työssä käsitellään kuitenkin vain palosuojaamattomia CLT-rakenteita.

Lasketun teoreettisen lujuuden ja jäykkyyden menettäneen kerroksen ulottuessa rakenteen poikittaiskerrokseen, tulee laskennassa tämä kerros jättää huomioimatta kokonaan. Jäljelle jääneet osittaiset pitkittäiskerrokset voidaan puolestaan huomioida kuvan 10 mukaisesti. (Dagenais et al. 2019, s. 397) Jäljelle jääneen pitkittäiskerroksen paksuuden tulee kuitenkin olla vähintään 3 mm, jotta se voidaan huomioida laskelmissa (Stora Enso 2016, s. 47).



Kuva 10. Palomitoituksessa käytettävät poikkileikkaukset (mukaillen Dagenais et al. 2019, s. 397).

Rakenteiden mitoituslujuuksien arvoina palotilanteessa tulee käyttää yleisesti

$$f_{d,fi} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_k k_{fi}, \quad (72)$$

missä $f_{d,fi}$ on palotilanteen lujuuden mitoitusarvo [N/mm^2],
 $k_{mod,fi}$ on käyttöluokkakerroin palotilanteessa,
 $\gamma_{M,fi}$ on materiaaliosavarmuuskerroin palotilanteessa ja
 f_k on lujuuden ominaisarvo [N/mm^2]. (SFS-EN 1995-1-2 2004, s. 32–34)

CLT-rakenteiden käyttöluokkakertoimena sekä materiaaliosavarmuuskertoimena palotilanteessa käytetään arvoa 1,0. Kertoimelle k_{fi} käytetään sen sijaan arvoa 1,15. Jäykkyysominaisuuksille palotilanteessa tulee vastaavasti käyttää arvoa

$$S_{20} = S_{05} k_{fi}, \quad (73)$$

missä S_{20} on jäykkyysominaisuuden 20 % fraktiili normaalilämpötilassa ja S_{05} on jäykkyysominaisuuden 5 % fraktiili normaalilämpötilassa. (Stora Enso 2016, s. 14)

6 TEKNISET VAATIMUKSET

Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999, 117 §) edellyttää, että rakennukset suunnitellaan ja toteutetaan käyttötarkoituksensa mukaisesti ottaen huomioon niille asetetut tekniset vaatimukset. Teknisiä vaatimuksia ovat muun muassa rakenteiden lujuus ja vakaus, paloturvallisuus, terveellisyys, käyttöturvallisuus, esteettömyys, meluntorjunta ja ääniolosuhteet sekä energiatehokkuus.

Aiemmissa luvuissa on perehdytty CLT-rakenteiden mitoittamiseen eli todentamaan niiden lujuus ja vakaus. Tässä luvussa käydään läpi muita rakenteiden kannalta oleellisia teknisiä vaatimuksia, joita ovat paloturvallisuus, ääneneristävyys ja energiatehokkuus sekä arvioidaan CLT-rakenteiden soveltuvuutta näihin vaatimuksiin. Rakenteiden ääneneristävyyslaskentaa ja energiatehokkuuteen vaikuttavan U-arvon laskentamenetelmiä ei tässä työssä käydä läpi, mutta niiden vaikutus huomioidaan hoivarakennukseen sovellettavissa rakenteissa.

6.1 Paloturvallisuus

Rakennuksen paloturvallisuuden vaatimukset täyttyvät, mikäli suunnittelussa käytetään palomääräysten taulukkomitoitusta tai oletettuun palonkehitykseen perustuvaa menetelmää. Rakennuksen paloturvallisuuden osoittamiseksi sen rakenteille asetetaan käyttötarkoituksensa mukaisia vaatimuksia rakenteiden kantavuuden sekä tiiveyden ja eristävyysvaatimusten suhteen. Näiden vaatimusten tähtyminen voidaan todentaa Eurokoodi 5:n laskentamenetelmillä. Tiiveyden ja eristävyysvaatimusten suhteen joudutaan usein kuitenkin tekemään standardin mukaisia polttokokeita laskennallisen menetelmän rajallisuuden vuoksi. (Lahtela 2018, s.10)

Tässä kappaleessa käsitellään palomääräysten taulukkomitoitukseen perustuvaa palomitoitusta, jonka avulla saadaan rakenteilta vaadittavat ominaisuudet. CLT-rakenteen käyttäytymistä palotilanteessa on käsitelty luvussa 5.

6.1.1 Rakennuksen paloluokka ja rakenteiden kantavuuden vaatimus

Rakennukset jaetaan paloluokkiin P0, P1, P2 ja P3 niiden käyttötarkoituksen, kerrosluvun ja -alan sekä korkeuden mukaan. Paloluokkia P1–P3 käytetään, kun rakennus

suunnitellaan asetuksen mukaisia luokkia ja lukuarvoja käyttäen. P0 paloluokkaa käytetään, jos rakennuksen tai sen olennaisten osien suunnittelussa käytetään oletettuun palonkehitykseen perustuvaa menetelmää. (Ympäristöministeriön asetus 848/2017, § 4)

Suunniteltavan puurunkoisen rakennuksen paloluokka voidaan määrittää taulukkomitoituksella, mutta tämä työ on rajattu P2-paloluokan hoivarakennukseen. Rakennuksen paloluokan, käyttötarkoituksen sekä muiden ominaisuuksien perusteella saadaan kantavilta rakenteilta vaadittava kantavuusvaatimus palotilanteessa sekä vaadittavat pinta- ja suojaverhousluokat.

6.1.2 Pintaluokka- ja suojaverhousvaatimukset

Rakennusmateriaalit eivät saa haitallisesti edistää palon kehitystä, jonka takia rakenteille asetetaan pintaluokka- ja suojaverhousvaatimuksia, jotka riippuvat rakennuksen käyttötarkoituksesta sekä paloluokasta (Ympäristöministeriön asetus 848/2017, § 22, 23). Materiaalin pintaluokka riippuu sen ominaisuuksien vaikutuksesta palon kehittymiselle. Suojaverhouksella tarkoitetaan puolestaan rakennustuotetta, joka suojaa sen takana olevaa tarviketta palon aiheuttamilta vaurioilta, kuten syttymiseltä tai hiiltymiseltä. (Ympäristöministeriön asetus 848/2017, § 2)

6.2 Ääneneristävyys

Rakennus tulee suunnitella ja toteuttaa siten, etteivät ulkopuolinen meluallistus ja ääniolosuhteet vaaranna terveyttä, lepoa tai työntekeä. Rakennuksen ääniolosuhteille, rakenteiden ääneneristävyydelle, taloteknisten laitteiden äänitasolle ja piha-alueiden meluntorjunnasta voidaan antaa tarkempia säännöksiä. (Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999, § 117)

Ympäristöministeriön asetuksen (796/2017, § 2, 4) mukaan rakenteiden tulee täyttää tilojen väliset sekä ilma- että askelääneneristysten vaatimukset, jotka on esitetty taulukossa 9. Äänitasoeroluvulla tarkoitetaan tilojen välistä ilmaääneneristystä ja askeläänitasoluvulla tilojen välistä askeläänieristystä.

Taulukko 9. Vaatimukset rakenteiden ääneneristävyydelle (mukaillen Ympäristöministeriön asetus 796/2017, § 4)

Huonetila	Pienin sallittu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ [dB]	Suurin sallittu askeläänitasoluku $L'_{nT,W} + C_{I, 50-2500}$ [dB]
Asuntojen, majoitus- tai potilashuoneiden välillä	55	53
Uloskäytävästä asuin-, majoitus- tai potilashuoneeseen	39	63

Näiden vaatimusten lisäksi rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyys on oltava vähintään 30 dB ja kapeakaistaisen, impulssimaisen tai pienitaajuisen melun keskiäänitaso ei saa ylittää 25 dB (Ympäristöministeriön asetus 769/2017 § 5). Ulkovaipan ääneneristävyyden laskennassa huomioidaan ulkovaipan rakenneosien pinta-alat ja ilmaääneneristysluvut sekä huonetilan mitat. Ulkovaipan ääneneristävyys liittyy enemmän tilasuunnitteluun kuin rakenteiden ääneneristävyyden suunnitteluun, jonka takia sitä ei tässä työssä käydä läpi.

Pelkkien CLT-rakenteiden ääneneristävyys on havaittu riittämättömäksi useimmissa tilanteissa. Niiden ääneneristävyyttä tulee parantaa muilla rakenteilla, joiden vaikutusta on havainnollistettu taulukossa 10, jossa esitetään eri tekijöiden vaikutusta CLT-välipohjan ääneneristävyyteen.

Taulukko 10. Eri tekijöiden vaikutuksia CLT-välipohjarakenteen ääneneristävyyteen (mukaillen Hu 2019, s. 492)

Tekijä	Vaikutus ilmaääneneristykseen	Vaikutus askeläänieristykseen
CLT:n paksuuden kasvattaminen 175 millimetristä 245 millimetriin	Merkittävä	Merkittävä
Ohuen askeläänieristeen käyttäminen CLT:n ja puisen pintakerroksen välissä	Ei merkitystä	Merkittävä
Pintakerrosten massan kasvattaminen	Merkittävä	Merkittävä
Jäykän askeläänieristeen käyttäminen CLT:n ja pintakerroksen välissä	Todella merkittävä	Todella merkittävä
Alaslaskun kipsilevytyksen lukumäärä (1 tai 2 kerrosta)	Ei merkitystä	Ei merkitystä
Kipsilevytyksen joustava kiinnitys CLT-rakenteeseen	Todella merkittävä	Todella merkittävä

Alaslaskun kipsilevyn kiinnitys (puukoolaus verrattuna teräsrankaan)	Todella merkittävä	Todella merkittävä
Alaslaskun ilmatilan kasvattaminen 100 millimetristä 200 millimetriin	Ei merkitystä	Ei merkitystä

6.3 Energiatohokkuus

Suunniteltavan rakennuksen tulee täyttää energiatohokkuusvaatimukset, joiden täyttyminen voidaan laskennallisesti todistaa täyttämällä E-luvun eli energiatohokkuusluvun vaatimukset. Rakennuksen ulkovaipan lämpöhäviö muodostaa yhdessä vuotoilman ja ilmanvaihdon kanssa koko rakennuksen lämpöhäviön. Rakennuksen lämpöhäviö saa olla korkeintaan vertailuarvoilla eli U-arvoilla lasketun lämpöhäviön suuruisen. (Ympäristöministeriön asetus 1010/2017, § 3, 23) Rakennuksen vaipan lämpöhäviöiden vertailuarvot on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Rakennuksen vaipan lämpöhäviöiden vertailuarvot (mukaillen Ympäristöministeriön asetus 1010/2017, § 24)

Rakenneosia	Vertailuarvo [$\text{W/m}^2\text{K}$]
Seinä	0,17
Massiivipuuseinä (keskimääräinen paksuus 180 mm)	0,40
Yläpohja ja ulkoilmaan rajoittuva alapohja	0,09
Ryömintätilaan rajoittuva alapohja	0,17
Maata vasten oleva rakennusosa	0,16
Ikkuna, kattoikkuna, ovi, kattovalokupu, savunpoisto- ja uloskäyntiluukku	1,0

Puun lämmönjohtavuus on muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna alhainen. CLT-rakenne harvoin kuitenkin riittää yksinään täyttämään sille asetetun U-arvo vaatimuksen, joten eristyskerroksen käyttö on suositeltavaa. Eristyskerros tulee asentaa CLT-rakenteen ulkopuolelle, jotta CLT pysyy lämpimällä puolella. Näin vähennetään kosteus- sekä lämpötilavaihteluiden aiheuttamien vaurioiden riskiä. CLT-rakenteissa ei tule käyttää höyrynsulkumuovia tai muuta vastaavaa kerrosta, joka estää kosteuden liikkumisen rakenteen läpi. Ilmatiiveyden saavuttamiseksi levyn ulkopuolisen ilmansulkukerroksen käyttö on kuitenkin suositeltavaa. (Finch ja Wang 2019, s. 533–537)

7 PALVELUTALO OULU SIENITIE

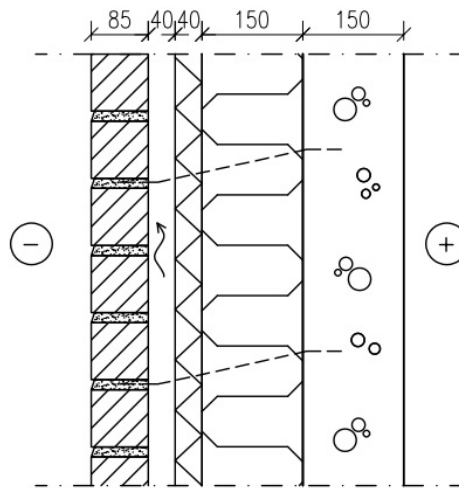
Mallikohteena tässä työssä käytetään vastikään valmistunutta betonirakenteista palvelutaloa, joka sijaitsee Oulussa Sienitiellä. Kohteen tilaajana on toiminut Attendo Suomi ja pääurakoitsijana Rakennusliike Lapti Oy. Arkkitehtisuunnittelusta on vastannut arkkitehtitoimisto Linja Arkkitehdit Oy ja rakennesuunnittelusta Insinööri- & Arkkitehtitoimisto Oy Palola & Piispanen. Kuvassa 11 on Linja Arkkitehdit Oy:n havainnekuva kohteesta.



Kuva 11. Palvelutalo Oulu Sienitie (Linja Arkkitehdit Oy, 2017).

Kohde on kaksikerroksinen ja kerrosalaltaan yhteensä 3120 m². Se sisältää 11 kappaletta palveluasumisen asuinhuonetta ja 56 kappaletta tehostetun palveluasumisen asuinhuonetta. Kohteen julkisivu on pääasiassa tiilimuurausta ja vesikatteena tiivissaumakate. Kohde on betonirakenteisena toteutettu paloluokassa P1.

Kohteen kantavat ulkoseinät ovat betonirakenteiset ja ei-kantavat ulkoseinät puurankarakenteiset. Kuvassa 12 on esitetty kantavan betoniulkoseinän rakenne.

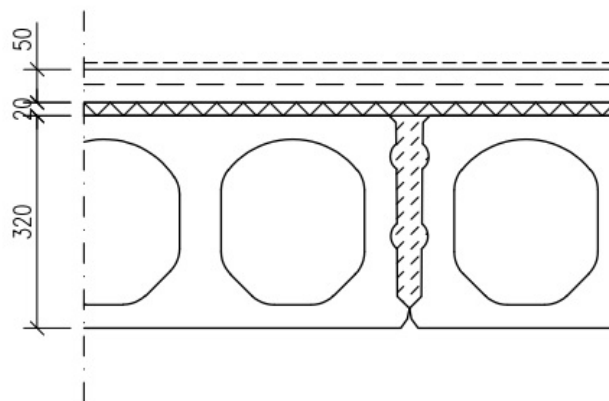


Kuva 12. Kantava betoniulkoseinä.

Ulkoseinäarakenteen rakennekerrokset ulkoa sisälle päin

- 85 mm julkisivumuuraus
- 40 mm tuuletusväli
- 40 mm tuulensuojavilla, lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo $\lambda_d = 0,033 \text{ W/mK}$,
- 150 mm kivivillaaeriste, lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo $\lambda_d = 0,036 \text{ W/mK}$
- 150 mm kantava teräsbetoniseinä

Kantavana väliseinäarakenteena on käytetty 180 mm vahvaa teräsbetoniseinää, ilman muita rakennekerroksia. Välipohja on toteutettu puolestaan ontelolaattarakenteella kuvan 13 mukaisesti.



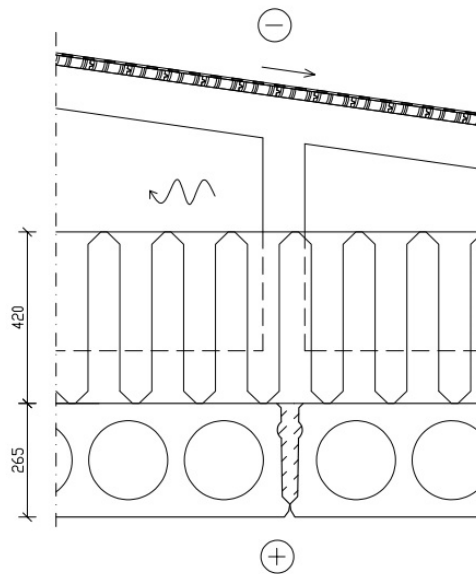
Kuva 13. Ontelolaattavälipohjarakenne.

Välipohjarakenteen rakennekerrokset ylhäältä alaspäin

- Pintamateriaali
- 50 mm lattiatasoite
- 20 mm askeläänieriste
- 320 mm O32 ontelolaatta

Mallikohteen suurin yksittäinen välipohjan jänneväli on yli 10,5 metriä. Tehostetun palveluasumisen asuinhuoneistojen kohdalla jänneväli on 7,5 metriä, sillä kahden asuinhuoneen välinen väliseinä on toteutettu ei-kantavana kevytrakenteisena seinänä. Palveluasumisen asuinhuoneistojen väliseinät ovat kaikki kantavia betoniseiniä, joiden välinen etäisyys on 5,4 metriä.

Yläpohjarakenne on niin ikään ontelolaattarakenteinen, ja se on esitetty kuvassa 14. Yläpohjan jännevälit ovat identtiset välipohjan jännevälien kanssa.



Kuva 14. Ontelolaattayläpohjarakenne.

Yläpohjarakenteen rakennekerrokset ylhäältä alas

- Tiivissaumakate
- Raakaponttilaudoitus
- Kattokannattajat, välissä tuulettuva ilmatila
- 420 mm puhallusvilla, lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo $\lambda_d = 0,041 \text{ W/mK}$
- 265 mm O27 ontelolaatta

8 PALVELUTALOON SOVELTUVAT CLT-RAKENTEET

Tässä luvussa esitetään, millaisilla CLT-rakenteilla P2-paloluokan hoivarakennus voidaan toteuttaa. P2-paloluokan hoivarakennuksen kerrosluvun ollessa kolmen ja kahdeksan välillä, saa korkeus olla enintään 28 metriä sekä kerrosala enintään 12000 m². Kerrosluvun ollessa kaksi tai alle, kerrosalaa ei rajoiteta, mutta silloin korkeus saa olla enintään 9 metriä. Näiden rajoitusten lisäksi hoivarakennuksen hoitopaikkojen määrää tulee rajoittaa siten, että niitä on yksikerroksisessa rakennuksessa enintään 200, kaksikerroksisessa enintään 50 ja yli kaksikerroksisessa enintään 150, edellyttäen, että rakennuksessa on automaattinen sammutuslaitteisto. (Ympäristöministeriön asetus 848/2017, § 8)

Edellisessä luvussa esitelty kaksikerroksinen betonirakenteinen palvelutalo voidaan siis toteuttaa CLT-rakenteilla paloluokassa P2 rajoittamalla paikkaluku 50:een. Sen kantaville rakenteille asetetaan palonkestovaatimus REI-30 sekä pintaluokkavaatimus B-s1,d0. Suojaverhousvaatimusta ei ole, sillä rakenteet ovat vähintään luokka D-s2,d2 sekä tiheys yli 350 kilogrammaa kuutiometrille. (Ympäristöministeriön asetus 848/2017, § 23, 24)

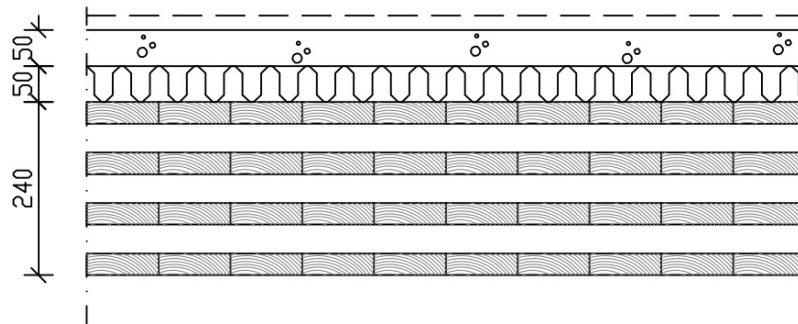
CLT-rakenteiden määrittämisen lähtökohtana tässä työssä on, että CLT-levyjä ei verhoilla mitenkään, jotta levyn valmista, näyttävää pintaa voidaan hyödyntää myös sisätilojen pintamateriaalina. Tällöin CLT-rakenteita voidaan myös lähes suoraan verrata aiemmin esitettyihin betonirakenteisiin. Sisäpuolinen pinta tulee palosuojakäsitellä pintaluokan B-s1,d0 vaatimusten mukaisesti, sillä palosuojamattoman CLT-levyn pintaluokka on heikompaa, D-s2,d0 luokkaa.

8.1 Välipohjarakenne

Välipohjarakennetta suunniteltaessa halutaan, että kantavan CLT-levyn alapinta jää valmiiksi sisäpinnaksi alapuolisen asuinhuoneiston kattoon. Tästä syystä ääneneristävyyden vaatimus asuinhuoneiden välillä on haastavaa täyttää, sillä siihen ei voida vaikuttaa muuten kuin kasvattamalla CLT-levyn paksuutta sekä valitsemalla tarkoin pintakerrosten ominaisuudet ja rakennepaksuudet. Rakenteen pienin sallittu äänitasoeroluku on 55 dB sekä suurin sallittu askeläänitasoluku on 53 dB. Rakenteen

ääneneristävyys on laskettu Calculatis-ohjelmiston ääneneristävyyslaskurilla ja laskennan tulokset on esitetty liitteessä 2. Välipohjarakenteen CLT-levyn paksuus määräytyy ääneneristävyyslaskelmien perusteella.

Välipohjarakenteen rakenteellinen mitoitus suoritetaan käyttäen mallikohteen palveluasumisen asuinhuoneiston jänneväliä, joka on 5,4 metriä. Rakenteen mitoitus on suoritettu aiemmin esitettyjen menetelmien mukaisesti, ja on esitetty niin ikään liitteessä 2. Kuvassa 15 on esitetty vaatimukset täyttävä välipohjarakenne.



Kuva 15. Vaatimukset täyttävä välipohjarakenne.

Välipohjarakenteen rakennekerrokset ylhäältä alas

- Pintamateriaali
- 50 mm lattiatasoite
- 50 mm askeläänieriste, mineraalivillalevy, dynaaminen jäykkyys $\leq 10 \text{ MN/m}^3$
- 240 mm CLT 7s, alapinnassa palosuojakäsittely B-s1,d0 -luokan vaatimusten mukaisesti

CLT 7s levy koostuu seitsemästä lamellikerroksesta. Pitkittäiskerrokset ovat 30 mm ja poikittäiskerrokset 40 mm paksuja. Taulukossa 12 on esitetty yhteenveto välipohjan rakenteellisesta mitoituksesta. Käyttöasteista huomataan, että rakenteella voidaan toteuttaa myös pidempiä jännevälejä kuin 5,4 metriä. Pidemmillä jänneväleillä mitoittavin tekijä on värähtely. Canadian CLT Handbookin menetelmän mukaan suurin mahdollinen jänneväli tällä rakenteella on 6,37 metriä. Rakenteen askeläänitasoluku on 53 dB ja äänitasoeroluku 61 dB.

Taulukko 12. Välipohjarakenteen rakenteellinen kestävyys eri menetelmien mukaan

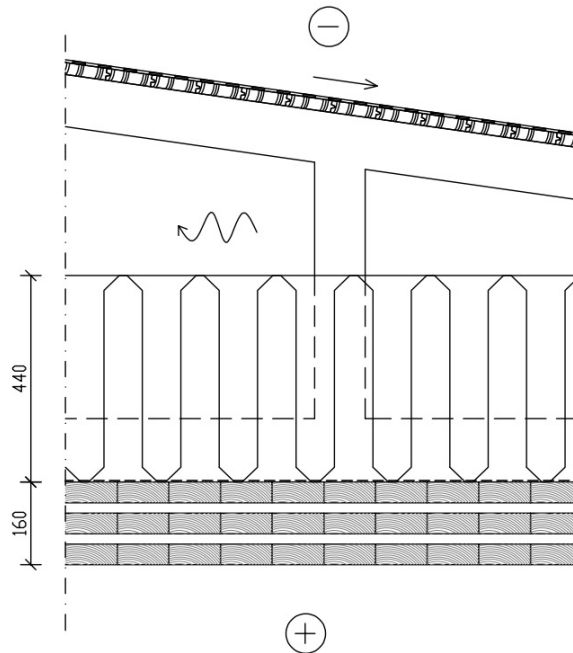
	Mitoitustilanne, menetelmä	Käyttöaste
Murtorajatila	Taivutuskestävyys Gamma-menetelmän mukaan	21,4 %
Murtorajatila	Taivutuskestävyys Wallner-Novak et. al mukaan	21,1 %
Murtorajatila	Taivutuskestävyys leikkausanalogian mukaan	20,8 %
Murtorajatila	Vierintäleikkauskestävyys	14,3 %
Murtorajatila	Pitkittäiskerroksen leikkauskestävyys	6,3 %
Murtorajatila	Puristuskestävyys kohtisuoraan tasoa vastaan	7,4 %
Käyttörajatila	Taipuma Gamma-menetelmän mukaan	61,0 %
Käyttörajatila	Taipuma leikkausanalogian mukaan	60,4 %
Käyttörajatila	Värähtely Suomen kansallisen liitteen menetelmän mukaan	71,9 %
Käyttörajatila	Värähtely Wallner-Novak et al. mukaan	80,1 %
Käyttörajatila	Värähtely Canadian CLT Handbookin mukaan	85,2 %
Palotilanne	Taivutuskestävyys leikkausanalogian mukaan	10,0 %
Palotilanne	Vierintäleikkauskestävyys	4,8 %
Palotilanne	Pitkittäiskerroksen leikkauskestävyys	2,3 %
Palotilanne	Puristuskestävyys kohtisuoraan tasoa vastaan	2,6 %

8.2 Yläpohjarakenne

Yläpohjarakennetta suunniteltaessa halutaan välipohjan tapaan, että kantavan CLT-levyn alapinta jää valmiiksi sisäpinnaksi alapuolisen asuinhuoneiston kattoon. Yläpohjarakenteelta ei kuitenkaan vaadita tilojen välistä ääneneristävyyttä, joten sen rakennepaksuus määräytyy rakenteellisen mitoituksen perusteella. Yläpohjarakenne tulee mitoittaa murtorajatilassa ja käyttörajatilassa taipuman suhteen. Värähtelymitoitusta ei yläpohjalta vaadita. Sen sijaan siltä vaaditaan energiatehokkuutta, jonka vertailuarvona käytetään 0,09 W/m²K.

Jännevälinä käytetään samaa kuin välipohjassa eli 5,4 metriä. Vaatimukset täyttävä ja rakenteellisen mitoituksen läpäisevä yläpohjarakenne on esitetty kuvassa 16. CLT L5s levy koostuu viidestä lamellikerroksesta. Pitkittäiskerrosten paksuus on 40 mm ja poikittäiskerrosten paksuus vastaavasti 20 mm. Taulukossa 13 on esitetty yhteenveto yläpohjarakenteen rakenteellisesta mitoituksesta, joka on esitetty tarkemmin liitteessä 3.

Rakenteen U-arvoksi saatiin $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja laskenta on suoritettu Laskentapalvelut.fi -sivuston laskentaohjelmalla, jonka tulokset on esitetty niin ikään liitteessä 3.



Kuva 16. Vaatimukset täyttävä yläpohjarakenne.

Yläpohjarakenteen rakennekerrokset ylhäältä alas

- Tiivissaumakate
- Raakaponttilaudoitus
- Kattokannattajat, välissä tuulettuva ilmatila
- 440 mm puhallusvilla, lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo $\lambda_d = 0,041 \text{ W/mK}$
- Ilmansulkukerros
- 160 mm CLT L5s, alapinnassa palosuoja- ja käsittely B-s1,d0 -luokan vaatimusten mukaisesti

Taulukko 13. Yläpohjarakenteen rakenteellinen kestävyys eri menetelmien mukaan

	Mitoitustilanne, menetelmä	Käyttöaste
Murtorajatila	Taivutuskestävyys Gamma-menetelmän mukaan	25,4 %
Murtorajatila	Taivutuskestävyys Wallner-Novak et al. mukaan	25,2 %
Murtorajatila	Taivutuskestävyys leikkausanalogian mukaan	25,1 %
Murtorajatila	Vierintäleikkauskestävyys	14,7 %
Murtorajatila	Pitkittäiskerroksen leikkauskestävyys	7,0 %

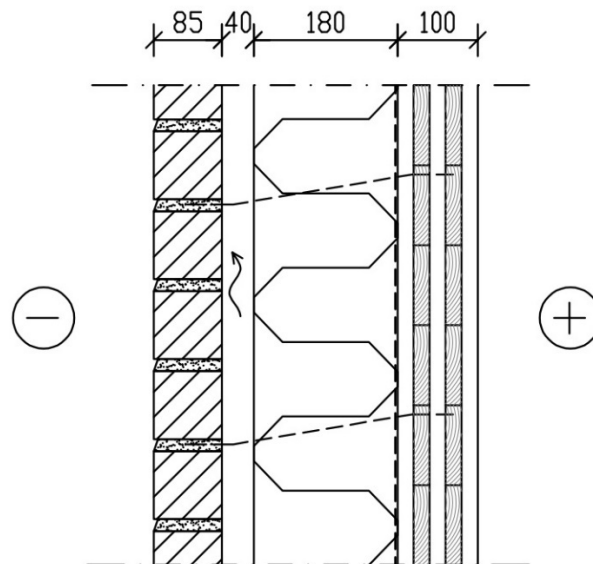
Murtorajatila	Puristuskestävyys kohtisuoraan tasoa vastaan	5,4 %
Käyttörajatila	Taipuma Gamma-menetelmän mukaan	98,2 %
Käyttörajatila	Taipuma leikkausanalogian mukaan	99,0 %
Palotilanne	Taivutuskestävyys leikkausanalogian mukaan	12,4 %
Palotilanne	Vierintäleikkauskestävyys	8,1 %
Palotilanne	Pitkittäiskerroksen leikkauskestävyys	3,6 %
Palotilanne	Puristuskestävyys kohtisuoraan tasoa vastaan	1,7 %

8.3 Kantava ulkoseinärakenne

Ulkoseinärakenteelta vaaditaan rakenteellisen kantavuuden lisäksi kestävyyttä palotilanteessa sekä lämmöneristävyyttä. Sen energiatehokkuuden vertailuarvona voidaan käyttää $0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$, mikäli CLT-rakenteen keskimääräinen paksuus ylittää 180 mm. Kaksikerroksisessa rakennuksessa rakenteellinen kantavuus saavutetaan kuitenkin huomattavasti ohuemmalla rakenteella. Pelkästään korkeamman energiatehokkuuden vertailuarvon takia ei ole järkevää käyttää yli 180 mm paksuja CLT-rakenteita, joten vertailuarvona joudutaan käyttämään $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pelkkä CLT-levy ei täytä näin tiukkaa vaatimusta, joten ulkopuolella käytetään kivivillaeristettä tarvittava määrä. Rakenteen energiatehokkuuden vertailuarvo on määritetty Laskentapalvelut.fi -sivuston laskentaohjelmistoa käyttäen ja on esitetty liitteessä 4. Rakenteen vertailuarvoksi saatiin $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Liitteessä 4 esitettyjen rakennelaskelmien perusteella riittävä rakenteellinen kantavuus saavutetaan 100 mm paksuisella CLT-levyllä, joka koostuu viidestä lamellikerroksesta. Näin ohutta rakennetta käytettäessä tulee kiinnittää huomiota lamellikerrosten määrään, sillä palotilanteessa sisäpuolen pystylamellikerros hiiltyy kokonaan. Tällöin myöskään hiiltymisen puoleista vaakalamellikerrosta ei voida huomioida mitoituksessa, vaikka se ei hiiltäisikään kokonaan. Hiiltymisen seurauksena jäljelle tulee jäää vähintään kaksi pystylamellikerrosta, jotta rakenne säilyttää kantavuutensa.

Kuvassa 17 on esitetty vaatimukset täyttävä seinärakenne. Laskelmien yhteenveto on esitetty taulukossa 14. CLT C5s levy koostuu viidestä lamellikerroksesta, joiden kaikkien paksuus on 20 mm.



Kuva 17. Vaatimukset täyttävä ulkoseinärakenne.

Ulkoseinärakenteen rakennekerrokset ulkoa sisälle päin

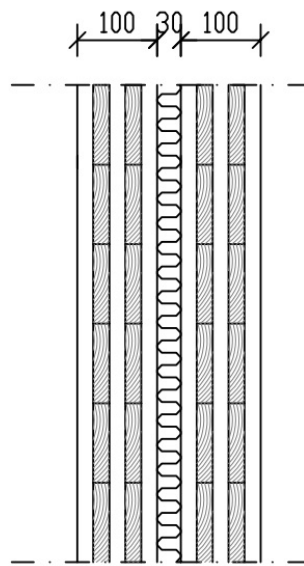
- 85 mm julkisivumuuraus
- 40 mm tuuletusväli
- 180 mm kivivillaeriste, jossa tuulensuoja mukana, lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo $\lambda_d = 0,033 \text{ W/mK}$
- Ilmansulkukerros
- 100 mm CLT C5s, sisäpinnassa palosuojakäsittely B-s1,d0 -luokan vaatimusten mukaisesti

Taulukko 14. Ulkoseinärakenteen rakenteellinen kestävyys eri menetelmien mukaan

	Mitoitustilanne, menetelmä	Käyttöaste
Murtorajatila	Puristuskestävyys	4,2 %
Murtorajatila	Nurjahdus Gamma-menetelmän mukaan	17,8 %
Murtorajatila	Nurjahdus leikkausanalogian mukaan	14,9 %
Murtorajatila	Paneelileikkauskestävyys	2,5 %
Murtorajatila	Lamellileikkauskestävyys	3,1 %
Murtorajatila	Lamellien kosketuspinnan vääntöleikkauskestävyys	2,5 %
Palotilanne	Puristuskestävyys	3,7 %
Palotilanne	Nurjahdus Gamma-menetelmän mukaan	17,8 %
Palotilanne	Nurjahdus leikkausanalogian mukaan	5,4 %

8.4 Kantava väliseinärakenne

Väliseinissä käytetään kahta toisistaan irti olevaa, itsenäisesti toimivaa CLT-levyä, sillä yksittäinen CLT-levy ei riitä täyttämään äänitasoeroluvun vaatimusta 55 dB. Väliseinärakenteelle kohdistuu samat kuormitukset kuin ulkoseinärakenteelle, joten sen rakenteellinen kantavuus on todettu. Ainoastaan rakenteen ääneneristävyys tulee määrittää. Se on laskettu Calculatis -ohjelmiston ääneneristävyyslaskurilla, ja tulokset on esitetty liitteessä 5. Kuvassa 18 on esitetty vaatimukset täyttävä väliseinärakenne.



Kuva 18. Vaatimukset täyttävä väliseinärakenne.

Väliseinärakenteen rakennekerrokset

- 100 mm CLT C5s, huoneiston puoleisessa palosuojakäsittely B-s1,d0 -luokan vaatimusten mukaisesti
- 30 mm mineraalivillalevy
- 100 mm CLT C5s, huoneiston puoleisessa pinnassa palosuojakäsittely B-s1,d0 -luokan vaatimusten mukaisesti

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Tässä luvussa arvioidaan työssä esitettyjen teorioiden eroavaisuuksia sekä soveltuvuutta käytännön suunnittelutyöhön ja käydään läpi betonirakenteiden korvaaminen CLT-rakenteilla sekä sen reunaehdot ja vaikutukset hoivarakennukseen. Lisäksi esitetään vaihtoehtoisia CLT-rakennratkaisuja sekä näkökulmia, joiden avulla CLT-rakenteiden ominaisuuksia voitaisiin edelleen hyödyntää paremmin.

Taivutetun CLT-rakenteen teoriat pyrkivät kaikki omalla tavallaan kuvaamaan poikkitaikarosten toimintaa pitkittäiskerroksia toisiinsa liittävinä kappaleina. Taivutuskestävyyden teoriat poikkeavat toisistaan hyvin vähäisesti ja niiden antamat tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, kun niitä sovelletaan mallikohteen rakenteiden laskentaan. Välipohjarakenteen käyttöasteiden välillä oli 0,6 % ja yläpohjarakenteella vain 0,3 %. Eurokoodi 5:een perustuvaa Gamma-menetelmää käytettäessä tulee huomioida, ettei se sovellu sellaisenaan yli viisi lamellikerrosta sisältäville poikkileikkauksille, joille tulee lisäksi soveltaa liitteen 1 mukaista lineaarista yhtälöryhmää. Lisäksi poikkileikkausarvot ovat riippuvaisia rakenteen jännevälistä, jolloin niiden laskenta tulee suorittaa tapauskohtaisesti aina uudestaan. Tästä johtuen käytännön suunnittelutyöhön parhaiten soveltuu leikkausanalogia, jolla voidaan huomioida myös poikkitaikarosten jäykkyys. Sen avulla poikkileikkausarvojen laskenta ei myöskään ole jännevälistä riippuvaista, joten suunnittelussa voidaan hyödyntää valmiiksi kullekin poikkileikkaukselle taulukoituja arvoja.

CLT-rakenteen leikkauskestävyys kohtisuoraan tasoa vastaan tunnetaan hyvin, eikä sen laskentaperiaatteista löydy eroavaisuuksia eri lähteiden välillä. Sen sijaan levyn tason suuntaisia leikkausjännityksiä on tutkittu verrattain vähän ja rakenteen leikkausjännitysten tarkka määrittäminen on haastavaa. Tason suuntaisen leikkauksen aiheuttamia murtomekanismeja on tunnistettu kolme, joiden laskentamenetelmistä ollaan yleisesti samaa mieltä.

Rakenteen stabiliteettiin liittyvä nurjahdusilmiö voidaan niin ikään mitoittoa joko Gamma-menetelmän tai leikkausanalogian mukaan. Menetelmillä saatujen tulosten välillä on poikkileikkauksesta riippuen jopa merkittäviä eroja Gamma-menetelmän antaessa konservatiivisempia tuloksia. Suurin havaittu ero mallikohteen rakenteita mitoitettaessa oli palotilanteen pilarin nurjahduksessa, jossa eroa käyttöasteiden välillä

oli 12,4 %. Yksi tulosten eroa selittävä tekijä voi olla Gamma-menetelmän nurjahduksesta johtuvan pienennyskerroimen kohdistuessa rakenteen puristuskestävyyteen yhteisvaikutusyhtälössä, kun puolestaan leikkausanalogian mukainen pienennyskerroin kohdistuu taivutuskestävyyteen. Rakenteen kiepahduksen mitoitusta sen sijaan ei lähdeoteoksissa käsitellä leikkausanalogian mukaan, joten ainoaksi vaihtoehdoksi jää Wallner-Novakin et al. -menetelmän käyttö.

Käyttörajan taipumamitoituksen teorian ovat taivutusmitoituksen tapaan hyvin samanlaisia keskenään. Ainoana selvänä erona voidaan pitää sitä, että leikkausanalogian avulla voidaan huomioida myös pitkittäiskerrosten leikkausmuodonmuutokset. Mallikohteen laskelmien perusteella sen merkitys on kuitenkin hyvin vähäinen, vaikka lasketut rakenteet olivat paksuudeltaan ja lamellikerrosmäärältään toisistaan poikkeavia.

Värähtelymitoituksen teorioiden erot ovat sen sijaan huomattavia. Suomen kansallisen liitteen menetelmä on muokattu palkkivälipohjan värähtelymitoituksesta. Hun et al. (2019, s.346) mukaan CLT:n ominaisuudet poikkeavat kuitenkin oleellisesti palkkivälipohjasta, jolloin myöskään palkkivälipohjan värähtelymitoitusten menetelmät eivät todennäköisesti sovellu CLT-rakenteille. Suomen kansallisen liitteen menetelmä ei myöskään esitä erityistarkastelua, joka tulisi suorittaa alle 9 Hz ominaistajuuden omaaville rakenteille. Wallner-Novakin et al. esittämä menetelmä puolestaan jakaa rakenteet eri värähtelyluokkiin asettaen kullekin luokalle omat vaatimuksensa, joita ovat rakenteen alin sallittu ominaistajuus sekä henkilön kävelystä rakenteeseen syntyvän kiihtyvyyden vaatimus. Myös rakenteen poikittaisjäykkyyden ja pintakerroksen parantavan vaikutuksen huomioimisessa on eroavaisuutta Suomen kansallisen liitteen menetelmään. Canadian CLT Handbookin menetelmä perustuu puolestaan täysmittakaavakokeisiin, joita on suoritettu pelkille CLT-rakenteille ilman pintakerroksia. Menetelmä perustuu rakenteen suurimman sallitun jännevälin rajoittamiseen sekä rakenteen tuen jäykkyyden tarkistamiseen. Muista menetelmistä poiketen pintakerroksena käytettävä betonivalu huonontaa CLT-rakenteen värähtelykäyttäytymistä, sillä sen massan ollessa yli kaksinkertainen CLT-levyn massa nähden, tulee sallittua jänneväliä pienentää 10 %. Mallikohteen laskelmissa pienin käyttöaste värähtelyn suhteen saatiin Suomen kansallisen liitteen menetelmällä ja suurin Canadian CLT Handbookin menetelmällä. Eroa pienimmän ja suurimman käyttöasteen välillä oli huomattava 13,3 %. Laskelmat suoritettiin vain yhdelle rakenteelle, joten tuloksia ei tule kuitenkaan yleistää. Tuloksien ja teorioiden eroavaisuuksista voidaan

kuitenkin päätellä, että aiheen jatkotutkimukselle olisi tarvetta. Värähtelyn monimuotoisuudesta sekä menetelmien suurista eroavaisuuksista johtuen käytännön suunnittelutyössä on suositeltavaa huomioida kaikki eri värähtelymitoitusmenetelmät.

Suoritetuista laskelmista havaitaan, että betonirakenteisen kohteen toteuttaminen sellaisenaan CLT-rakenteilla on haastavaa, erityisesti välipohjarakenteen värähtelyn vuoksi. Pienillä rakenteellisilla muutoksilla rakenteiden jänneväleihin päästään kuitenkin jo kohtuullisiin CLT-rakennratkaisuihin. Jännevälejä voidaan myös hallita käyttämällä rakenteen välitukena esimerkiksi puu- tai teräspalkkia. Canadian CLT Handbookin värähtelymenetelmä asettaa kuitenkin jäykkyysvaatimuksen myös rakennetta tukevalle palkille, joka voi vuorostaan olla haastavaa täyttää pidemmillä jänneväleillä.

Rakennevahvuus ulkoseinässä on mallikohteen ulkoseinärakenteeseen verrattuna 60 millimetriä ohuempi, mutta puolestaan väliseinärakenne 50 mm vahvempi kahden erillisen CLT-levyn takia. Välipohja voidaan toteuttaa hieman pienemmillä jänneväleillä noin 50 millimetriä ohuemmalla, ja yläpohja jopa 100 mm ohuemmalla rakenteella. Rakennevahvuuksilla ei mallikohteessa saavutettaisi enempää kerrosalaa, mutta mahdollistaa hieman suuremman kerroskorkeuden.

Pelkän yksittäisen CLT-levyn käyttö välipohjan kantavana rakenteena ei välttämättä ole järkevin ja kustannustehokkain ratkaisu, sillä esimerkiksi mallikohteen välipohjan CLT-levyn paksuus määräytyi pelkästään ääneneristävyytlaskelmien mukaan. Rakenteen kapasiteettia jäi hyödyntämättä sekä käyttörajatilassa että varsinkin murtorajatilassa. Eräs vaihtoehto välipohjaan voisi olla CLT-betoni-liittorakenteen hyödyntäminen. Yeohin (2010, s. 32) mukaan liittorakenteessa CLT-levyn ja betonilaatan välille muodostetaan leikkausrasituksia välittävä liitos, jolloin pystytään hyödyntämään kummankin materiaalin ominaisuuksia parhaiten. Rakennetta taivutettaessa betoni toimii puristettuna ja CLT-levy vastaavasti vedettynä rakenteena. Liittorakenteen etuna tässä työssä käytettyyn rakenteeseen verrattuna on ennen kaikkea suurempi taivutusjäykkyys, joka vaikuttaa suoraan rakenteen taipumaan ja värähtelyominaisuuksiin. Ääneneristävyyden vaatimuksia pelkkä CLT-betoniliittorakenne ei todennäköisesti pysty täyttämään ilman täydentäviä rakenneosia, sillä CLT-levyn ja betonilaatan välillä ei voida käyttää askeläänieristekerrosta kuten mallikohteen CLT-rakenteisessa välipohjassa.

Toinen pelkkää CLT-levyä tehokkaampi rakenne on niin kutsuttu CLT-ripalaatta, joka koostuu CLT-levystä, jonka alapintaan on kiinnitetty liimapuupalkkeja. Joissain tapauksissa myös liimapuupalkkien alapuolella voi olla toinen CLT-levy, jolloin muodostuu suljettu kotelorakenne. CLT-ripalaatan jäykkä rakenne mahdollistaa jopa yli 16 metrisien jännevälien käytön, joka on huomattavasti suurempi pelkkään CLT-levyyn verrattuna (Stora Enso 2020, s. 129). CLT-ripalaatta mahdollistaa myös erilaisten ääneneristävyyssratkaisuiden kuten askeläänieristeiden ja liimapuupalkkien välisen äänieristekerroksen käytön.

Eräs mielenkiintoinen näkökulma CLT-rakenteiden suorituskyvyn parantamiseen on poikittaiskerrosten laminointi perinteisen 90° asteen kulmasta poiketen 45° asteen kulmaan. Buchin et al. (2016, s.10) mukaan 45° asteen kulmaan laminointi kasvattaa rakenteen taivutuskestävyyttä yli 35 % ja taivutusjäykkyyttä vastaavasti yli 15 %. Rakenteessa havaittiin 45° asteen kerroksissa murtumismekanismi, joka oli vierintäleikkausmurtumisen ja pitkittäissuuntaisen leikkausmurtumisen yhdistelmä. Tämä murtumismekanismi tulisi myös pystyä huomioimaan rakennetta mitoitettaessa.

10 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä käytiin läpi CLT-rakenteiden mitoittamisen menetelmiä, niiden eroavaisuuksia sekä soveltuvuutta käytännön suunnittelutyöhön. Lisäksi tutkittiin, voidaanko kaksikerroksisen palvelutalon kantavat betonirakenteet korvata CLT-rakenteilla.

Taivutetun CLT-rakenteen mitoittamiseen soveltuvat menetelmät Gamma-menetelmä ja leikkausanalogia todettiin molemmat tulosten tarkkuuden sekä teorioiden vähäisen poikkeavuuden puolesta soveltuvan käytännön suunnittelutyöhön. Gamma-menetelmä on kuitenkin varsinkin käsinlaskennassa työläämpi menetelmä, jolla rakenteen poikkileikkausarvot joudutaan määrittämään aina uudelleen rakenteen jännevälin muuttuessa. Leikkausanalogian mukaiset poikkileikkausarvot eivät sen sijaan ole jännevälistä riippuvaisia, jolloin poikkileikkauksille voidaan hyödyntää valmiiksi taulukoituja arvoja.

Muita mitoitusilanteita kuten rakenteen tasoa kohtisuoraan vastaan ja tason suunnassa esiintyvää leikkausta, puristuskestävyyttä tason suunnassa ja kohtisuoraan sitä vastaan tutkittiin eri mitoitusilanteiden sekä murtumismekanismien kautta. Lähdeaineistoissa ei näiden suhteen löydetty merkittäviä poikkeamia. Nurjahduksen suhteen huomattiin sen sijaan pieniä eroavaisuuksia Gamma-menetelmän ja leikkausanalogian teorioiden ja tulosten välillä. Kiepahdusta puolestaan ei lähdeaineistossa esitetty kuin pelkästään Gamma-menetelmällä.

CLT-rakenteiden taipumamitoituksessa ei taivutuskestävyyden tapaan huomattu merkittäviä eroja menetelmien välillä. Värähtelymitoitusmenetelmien teorioiden ja laskentatulosten välillä havaittiin sen sijaan merkittäviä eroja, jonka takia niiden kaikkien huomiointi käytännön suunnittelutyössä on suositeltavaa. Jatkotutkimukselle värähtelymitoitusmenetelmistä on tarvetta.

Palvelutaloon soveltuvat CLT-rakenteet mitoitettiin työssä esitettyjen teorioiden pohjalta sekä ottaen huomioon Suomen rakentamislainsäädännön asettamat tekniset vaatimukset. Laskelmista voidaan todeta, että betonirakenteiden korvaaminen CLT-rakenteilla on haastavaa, mikäli vaakarakenteiden jännevälejä ei pienennetä. Rajoittavaksi tekijäksi tuli

erityisesti välipohjan värähtelyominaisuudet. Jännevälejä pienentämällä päästiin kuitenkin kohtuullisiin CLT-rakenneratkaisuihin.

Työn suurimpana haasteena oli aiheen rajaus. Kokonaisen rakennuksen kantavien rakenteiden suunnittelu on aiheena valtava ja siihen sisältyy niin monta mitoituslannetta ja näkökulmaa, ettei niitä kaikkea voinut mitenkään sisällyttää tähän työhön. Työn alkuperäiseen tavoitteeseen kuului myös rakenteiden välisten liitosten tutkiminen sekä valmiiden rakennesuunnitelmien tuottaminen, mutta ne jouduttiin työn edetessä rajaamaan työn ulkopuolelle. CLT-rakenteiden välisten liitosten tutkiminen voisi olla yksi jatkotutkimuksen aihe.

Työn tuloksena saatiin kuitenkin P2-paloluokan hoivarakennukseen soveltuvat CLT-rakenteet sekä vankka teoriapohja CLT-rakenteiden mitoittamiseen. Työn tekeminen on opettanut valtavasti CLT-rakenteista, niiden toiminnasta, erityispiirteistä sekä yleisesti rakennuksen kantavien rakenteiden suunnittelusta.

LÄHDELUETTELO

Bogensperger T., Augustin M. & Schickhofer G., 2011. Properties of CLT-Panels Exposed to Compression Perpendicular to their Plane [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://pure.tugraz.at/ws/portalfiles/portal/2845712/CIB-2011_44-12-1-Version1.0.pdf [viitattu 16.10.2020] 15 s.

Buch D., Wang X., Hagman O. & Gustafsson A. 2016. Bending Properties of Cross Laminated Timber (CLT) with a 45° Alternating Layer Configuration [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_11/BioRes_11_2_4633_Buck_WHG_Development_CLT%20Material_Building_Construction_9029.pdf [viitattu 22.5.2021] 12 s.

Dagenais C., Ranger L. & Bénichou N., 2019. Fire performance of cross-laminated timber assemblies. Teoksessa: Karacabeyli E. & Gagnon S. (toim.) Canadian CLT Handbook, 2019 Edition, Volume I & II [verkkodokumentti]. Quebec: FPInnovations. Saatavissa: <https://web.fpinnovations.ca/clt/> [viitattu 15.10.2020] s. 361–462. ISBN 978-0-86488-592-0

Finch G. & Wang J. 2019. Building enclosure design of cross-laminated timber construction. Teoksessa: Karacabeyli E. & Gagnon S. (toim.) Canadian CLT Handbook, 2019 Edition, Volume I & II [verkkodokumentti]. Quebec: FPInnovations. Saatavissa: <https://web.fpinnovations.ca/clt/> [viitattu 07.05.2021] s. 517–582. ISBN 978-0-86488-592-0

Hu L., 2019. Acoustic performance of cross-laminated timber assemblies. Teoksessa: Karacabeyli E. & Gagnon S. (toim.) Canadian CLT Handbook, 2019 Edition, Volume I & II [verkkodokumentti]. Quebec: FPInnovations. Saatavissa: <https://web.fpinnovations.ca/clt/> [viitattu 15.10.2020] s. 471–516. ISBN 978-0-86488-592-0

Hu L., Chui Y.H. & Cuerrier-Auclair S., 2019. Vibration performance of cross-laminated timber floors. Teoksessa: Karacabeyli E. & Gagnon S. (toim.) Canadian CLT Handbook, 2019 Edition, Volume I & II [verkkodokumentti]. Quebec: FPInnovations.

Saatavissa: <https://web.fpinnovations.ca/clt/> [viitattu 15.10.2020] s. 313–360. ISBN 978-0-86488-592-0

Karacabeyli E. & Gagnon S., 2019. Introduction to cross-laminated timber. Teoksessa: Karacabeyli E. & Gagnon S. (toim.) Canadian CLT Handbook, 2019 Edition, Volume I & II [verkkodokumentti]. Quebec: FPInnovations. Saatavissa: <https://web.fpinnovations.ca/clt/> [viitattu 15.04.2020] s. 11–52. ISBN 978-0-86488-592-0

Lahtela, T. 2018. Paloturvallinen puutalo – asuin- ja toimitilarakentaminen [verkkodokumentti]. Helsinki: Puuinfo Oy. Saatavissa: https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Palokirja_LOW_p%C3%A4ivitetty-21.2.20.pdf [viitattu 22.5.2020] 104 s.

Liu Y., Guo H., Sun C. & Chang W-S., 2016. Assessing Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Material for Mid-Rise Residential Buildings in Cold Regions in China – A Life-Cycle Assessment Approach [verkkodokumentti]. Bath: University of Bath. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/309113824_Assessing_Cross_Laminated_Timber_CLT_as_an_Alternative_Material_for_Mid-Rise_Residential_Buildings_in_Cold_Regions_in_China-A_Life-Cycle_Assessment_Approach [viitattu 11.6.2021] 14 s.

Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. Annettu Helsingissä 5.2.1999.

Popovski M., Gagnon S., Mohammad M. & Chen Z., 2019. Structural design of cross-laminated timber elements. Teoksessa: Karacabeyli E. & Gagnon S. (toim.) Canadian CLT Handbook, 2019 Edition, Volume I & II [verkkodokumentti]. Quebec: FPInnovations. Saatavissa: <https://web.fpinnovations.ca/clt/> [viitattu 15.04.2020] s. 105–172. ISBN 978-0-86488-592-0

SFS-EN 1990, 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 85 + 101 s.

SFS-EN 1995-1-1, 2014. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1.1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 3. Painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 99 + 12 s.

SFS-EN 1995-1-2, 2004. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1.2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus. 2. Painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 83 + 48 s.

Silly, G., 2010. Numerische Studien zur Drill- und Schubsteifigkeit von Brettsperrholz (BSP) [verkkodokumentti]. Graz: University of Graz. Saatavissa: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a824e0a5fa&location=browse> [viitattu 22.10.2020] 100 s.

Stora Enso, 2016. CLT – Cross Laminated Timber – Fire Protection [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-specifications/wood-products/clt-technical/fire-protection/clt-documentation-on-fire-protection-en.pdf> [viitattu 22.5.2021] 51 s.

Stora Enso, 2017. Stora Enso CLT, Puu – maailman vanhin ja myös modernein rakennusmateriaali [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Product-brochures/Wood-products/CLT-Imagebrochure_final-2016-04-25_FI-WEB.pdf [viitattu 22.5.2021] 11 s.

Stora Enso, 2020. CLT Rib Panels by Stora Enso, Structural Design Manual [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-specifications/wood-products/rib-panel-technical/structural-design-manual-clt-rib-panels-by-stora-enso.pdf> [viitattu 22.5.2021] 129 s.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2017. RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 231 s. ISBN 978-951-758-604-7.

Wallner-Novak M., Koppelhuber J. & Pock K., 2014. Cross-Laminated Timber Structural Design [verkkodokumentti]. Wien: ProHolz Austria. Saatavissa: <https://www.kurtpock.at/files/content/Veroeffentlichungen/Buecher/2014%20Wallner-Novak%20M.,%20CLT%20structural%20design%20proHOLZ.pdf> [viitattu 31.08.2020] 191 s.

Wallner-Novak M., Augustin M., Koppelhuber J. & Pock K., 2018. Cross-Laminated Timber Structural Design Volume 2 [verkkodokumentti]. Wien: ProHolz Austria. Saatavissa: <https://www.kurtpock.at/files/content/Veroeffentlichungen/Buecher/2018%20Wallner-Novak%20M.,%20CLT%20structural%20design%20II%20proHOLZ.pdf> [viitattu 31.08.2020] 154 s.

Yeoh, D. 2010. Behaviour and design of timber-concrete composite floor system [verkkodokumentti]. Canterbury: University of Cantenbury. Saatavissa: https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/4428/thesis_mainbody.pdf?sequence=2&isAllowed=y [viitattu 22.5.2021] 210 s.

Ympäristöministeriö, 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus – puurakenteet [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BF48BD8DA-D384-481B-BC09-FE51691B8BE8%7D/123939> [viitattu 21.5.2021] 33 s.

Ympäristöministeriön asetus, 477/2014. Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista. Annettu Helsingissä 17.6.2014.

Ympäristöministeriön asetus, 796/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä. Annettu Helsingissä 24.11.2017.

Ympäristöministeriön asetus, 848/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Annettu Helsingissä 28.11.2017.

Ympäristöministeriön asetus, 1010/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Annettu Helsingissä 20.12.2017.

$$\begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & v_{3,2} & v_{3,3} & v_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & v_{m,m-1} & v_{m,m} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \vdots \\ \gamma_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix}$$

$$v_{i,i} = (C_{i-1,i} + C_{i,i+1} + D_i) * d_i$$

$$v_{i,i-1} = -C_{i-1,i} * d_{i-1}$$

$$v_{i,i+1} = -C_{i,i+1} * d_{i+1}$$

$$C_{j,k} = \frac{b * G_{R,jk}}{h_{j,k}}$$

$$D_i = \frac{\pi^2 E_i b d_i}{L^2}$$

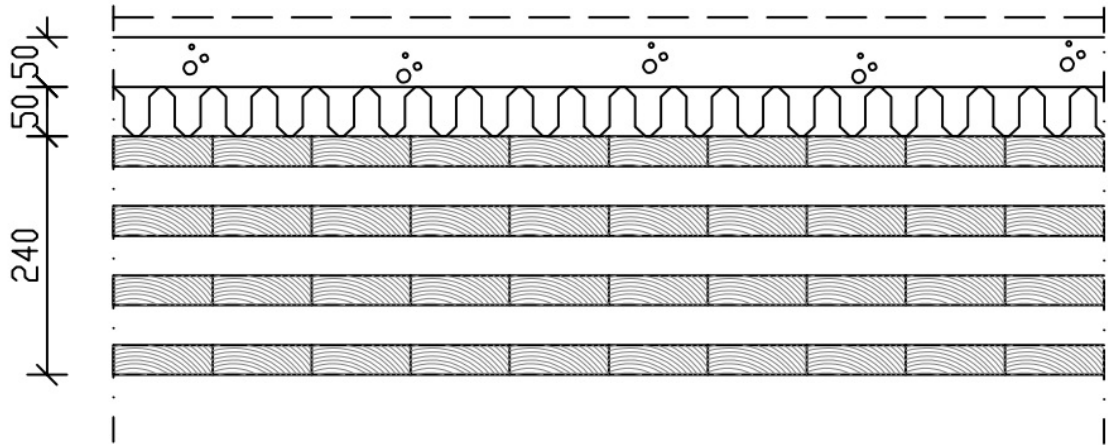
$$s_i = -C_{i,i+1} * (d_{i+1} - d_i) + C_{i-1,i} * (d_i - d_{i-1})$$

Yhtälöryhmän ratkaisu

$$[V][\gamma] = [s]$$

$$[\gamma] = [V]^{-1}[s]$$

Välipohjan jänneväli $L=5,4$ metriä. Tarkastellaan rakenne yksiaukkoisena, päistään nivelellisesti tuettuna ja yhteen suuntaan kantavana rakenteena. Mitoitus suoritetaan 1,0 metrin levyisenä kaistana. Materiaaliarvoina käytetään luvun 2 taulukon 1 mukaisia arvoja.



Kuva L2.1. Tarkasteltava välipohjarakenne.

Pysyvät kuormat

CLT omapaino $1,2 \text{ kN/m}^2$

Muiden rakenneosien omapaino $1,3 \text{ kN/m}^2$

Omapaino metrin kaistaa kohden $g_k = 1,2 \text{ kN/m} + 1,3 \text{ kN/m} = 2,5 \text{ kN/m}$

Muuttuvat kuormat

Hyötykuorma luokka A $2,0 \text{ kN/m}^2$

Kevyet puurakenteiset seinät $0,5 \text{ kN/m}^2$

Hyötykuorma metrin kaistaa kohden $q_k = 2,0 \text{ kN/m} + 0,5 \text{ kN/m} = 2,5 \text{ kN/m}$

Taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa

$$\begin{aligned}
 M_d &= \frac{(1,15 g_k + 1,5 q_k) * L^2}{8} \\
 &= \frac{(1,15 * 2,5 \text{ kN/m} + 1,5 * 2,5 \text{ kN/m}) * (5,4 \text{ m})^2}{8} = 24,148 \text{ kNm} \\
 &= 24,148 * 10^6 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

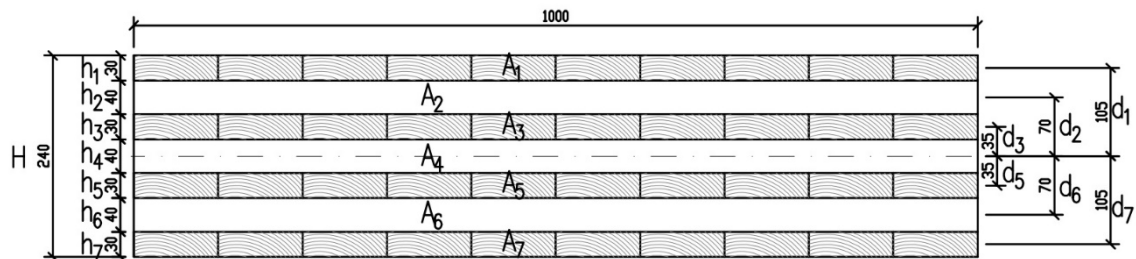
Leikkausvoiman mitoitusarvo

$$V_d = \frac{(1,15 g_k + 1,5 q_k) L}{2}$$

$$= \frac{(1,15 * 2,5 \text{ kN/m} + 1,5 * 2,5 \text{ kN/m}) * 5,4 \text{ m}}{2} = 17,888 \text{ kN}$$

Keskipitkä aikaluokka

$$\Rightarrow k_{\text{mod}} = 0,8$$

1. Murtorajatila**1.1 Taivutuskestävyyden mitoitus Gamma-menetelmän mukaan**

Kuva L2.2 Mitoitettava CLT-poikkileikkaus.

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_1 = A_3 = A_5 = A_7 = 30 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 30000 \text{ mm}^2$$

Liitosten hyötysuhdekertoimet γ_i

Rakenteessa on yli 5 lamellikerrosta, joten liitosten hyötykertoimet tulee ratkaista liitteen 1 mukaisella lineaarisella yhtälöryhmällä. Muodostetaan kerroinmatriisi [V] ja oikean puolen matriisi [s] sijoittamalla termit.

Kerroinmatriisi [V]

$$\begin{bmatrix} \left[C_2 + \frac{\pi^2 EA_1}{L^2} \right] d_1 & -C_2 d_3 & 0 & 0 \\ -C_2 d_1 & \left[C_2 + C_4 + \frac{\pi^2 EA_3}{L^2} \right] d_3 & -C_4 d_5 & 0 \\ 0 & -C_4 d_3 & \left[C_4 + C_6 + \frac{\pi^2 EA_5}{L^2} \right] d_5 & -C_6 d_7 \\ 0 & 0 & -C_6 d_5 & \left[C_6 + \frac{\pi^2 EA_7}{L^2} \right] d_7 \end{bmatrix}$$

Oikean puolen matriisi [s]

$$\begin{bmatrix} -C_2 \Delta d_2 \\ -C_4 \Delta d_4 + C_2 \Delta d_2 \\ -C_6 \Delta d_6 + C_4 \Delta d_4 \\ C_6 \Delta d_6 \end{bmatrix}$$

Laskenta taulukkomuodossa

0°	90°	b	$\frac{E_i}{E_c}$	h_i	$\frac{E_i}{E_c} A_i$	d_i	G_i	C_i	Δd_i	$\frac{\pi^2 EA_i}{L^2}$
								$= \frac{b G_i}{h_i}$		
-	-	[mm]	-	[mm]	[mm ²]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[mm]	[N/mm ²]
1		1000	1	30	30000	-105	-	-	-	117,28
	2	1000	0	40	-	-	65	1625	70	-
3		1000	1	30	30000	-35	-	-	-	117,28
	4	1000	0	40	-	-	65	1625	70	-
5		1000	1	30	30000	35	-	-	-	117,28
	6	1000	0	40	-	-	65	1625	70	-
7		1000	1	30	30000	105	-	-	-	117,28

Kerroinmatriisi [V] numeroarvoilla

$$\begin{bmatrix} -182939,4 & 56875 & 0 & 0 \\ 170625 & -117854,8 & -56875 & 0 \\ 0 & 56875 & 117854,8 & -170625 \\ 0 & 0 & -56875 & 182939,4 \end{bmatrix}$$

Oikean puolen matriisi [s] numeroarvoilla

$$\begin{bmatrix} -113750 \\ 0 \\ 0 \\ 113750 \end{bmatrix}$$

Ratkaisu

$$[\gamma] = [V]^{-1}[s] = \begin{bmatrix} 0,893 \\ 0,872 \\ 0,872 \\ 0,893 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_3 \\ \gamma_5 \\ \gamma_7 \end{bmatrix}$$

Tehollinen neliömomentti

$$I_{eff,0} = \sum_{i=1}^n (I_i + \gamma_i A_i d_i^2)$$

$$\begin{aligned} I_{eff,0} &= 4 \left(\frac{1000 \text{ mm} * (30 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2 (0,893 * 30000 \text{ mm}^2 * (105 \text{ mm})^2) \\ &\quad + 2 (0,872 * 30000 \text{ mm}^2 * (35 \text{ mm})^2) \\ &= 6,637 * 10^8 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\begin{aligned} \sigma_{m,d} &= \frac{M_d}{I_{eff}} (\gamma_1 d_1 + 0,5 h_1) \\ &= \frac{24,148 * 10^6 \text{ Nmm}}{6,637 * 10^8 \text{ mm}^4} (0,893 * 105 \text{ mm} + 0,5 * 30 \text{ mm}) \\ &= 3,946 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{m,k} k_{sys} = \frac{0,8}{1,25} * 24,0 \text{ N/mm}^2 * 1,2 = 18,432 \text{ N/mm}^2$$

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 3,946 \text{ N/mm}^2 \leq 18,432 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 21,4 \%}$$

1.2 Taivutuskestävyyden mitoitus Wallner-Novakin et al. mukaan

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala syysuunnassa

$$A_1 = A_3 = A_5 = A_7 = 30 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 30000 \text{ mm}^2$$

Etäisyys lamellikerrosten keskipisteestä poikkileikkauksen keskipisteeseen

$$d_1 = d_7 = 105 \text{ mm}, d_3 = d_5 = 35 \text{ mm}$$

Pitkittäiskerrosten neliömomentti

$$I_0 = \sum_{i=1}^n (I_i + A_i d_i^2)$$

$$\begin{aligned} I_0 &= 4 \left(\frac{1000 \text{ mm} * (30 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2 (30000 \text{ mm}^2 * (105 \text{ mm})^2) \\ &\quad + 2 (30000 \text{ mm}^2 * (35 \text{ mm})^2) \\ &= 7,440 * 10^8 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\begin{aligned} \sigma_{m,d} &= \frac{M_d}{I_0} (d_1 + 0,5 h_1) \\ &= \frac{24,148 * 10^6 \text{ Nmm}}{7,440 * 10^8 \text{ mm}^4} (105 \text{ mm} + 0,5 * 30 \text{ mm}) \\ &= 3,895 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 3,895 \text{ N/mm}^2 \leq 18,432 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 21,1\%}$$

1.3 Taivutuskestävyyden mitoitus leikkausanalogian mukaan

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala syysuunnassa

$$A_1 = A_3 = A_5 = A_7 = 30 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 30000 \text{ mm}^2$$

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala kohtisuoraa syysuuntaa vastaan

$$A_2 = A_4 = A_6 = 40 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 40000 \text{ mm}^2$$

Etäisyys lamellikerrosten keskipisteestä poikkileikkauksen keskipisteeseen

$$d_1 = d_7 = 105 \text{ mm}, d_2 = d_6 = 70 \text{ mm}, d_3 = d_5 = 35 \text{ mm}$$

Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus $H = 240 \text{ mm}$

Taivutusjäykkyys

$$EI_0 = EI_A + EI_B = \sum_{i=1}^n E_i \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i d_i^2$$

$$\begin{aligned}
 EI_A &= 4 \left(11550 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (30 \text{ mm})^3}{12} \right) \\
 &\quad + 3 \left(450 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (40 \text{ mm})^3}{12} \right) \\
 &= 1,111 * 10^{11} \text{ Nmm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 EI_B &= 2 (11550 \text{ N/mm}^2 * 30000 \text{ mm}^2 * (105 \text{ mm})^2) \\
 &\quad + 2 (450 \text{ N/mm}^2 * 40000 \text{ mm}^2 * (70 \text{ mm})^2) \\
 &\quad + 2 (11550 \text{ N/mm}^2 * 30000 \text{ mm}^2 * (35 \text{ mm})^2) \\
 &= 8,622 * 10^{12} \text{ Nmm}^2
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow EI_0 = 8,733 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\begin{aligned}
 \sigma_{m,d} &= M_d \frac{H}{2} \frac{E_1}{EI_0} = 24,148 * 10^6 \text{ Nmm} * \frac{240 \text{ mm}}{2} * \frac{11550 \text{ N/mm}^2}{8,733 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} \\
 &= 3,833 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 3,833 \text{ N/mm}^2 \leq 18,432 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 20,8 \%}$$

1.4 Tasoa vastaan kohtisuora leikkauskestävyys

Staattiset momentit

$$\begin{aligned}
 S_R &= \sum_{i=1}^{n_L} B h_i d_i = 1000 \text{ mm} * 30 \text{ mm} * 105 \text{ mm} + 1000 \text{ mm} * 30 \text{ mm} * 35 \text{ mm} \\
 &= 4200000 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Poikkileikkauksen painopiste sijaitsee poikittaisherroksessa

$$\Rightarrow S_0 = S_R$$

Vierintäleikkausjännityksen mitoitusarvo poikittaisherroksessa

$$\tau_{v,R,d} = \frac{V_d S_R}{I_0 B} = \frac{17888 \text{ N} * 4200000 \text{ mm}^3}{7,440 * 10^8 \text{ mm}^4 * 1000 \text{ mm}} = 0,101 \text{ N/mm}^2$$

Vierintäleikkauslujuuden mitoitusarvo

$$f_{v,R,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,R,k} = \frac{0,8}{1,25} * 1,1 \text{ N/mm}^2 = 0,704 \text{ N/mm}^2$$

Vierintäleikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{v,R,d} \leq f_{v,R,d} = 0,101 \text{ N/mm}^2 \leq 0,704 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 14,3 \%}$$

Leikkausjännityksen mitoitusarvo pitkittäiskerroksessa

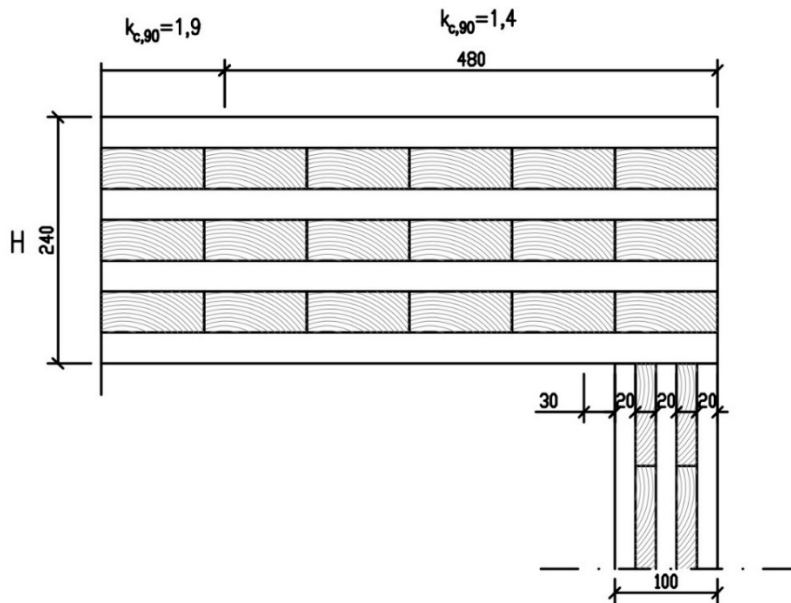
$$\tau_{v,d} = \frac{V_d S_0}{I_0 B} = \frac{17888 \text{ N} * 3000000 \text{ mm}^3}{7,440 * 10^8 \text{ mm}^4 * 1000 \text{ mm}} = 0,101 \text{ N/mm}^2$$

Pitkittäiskerroksen leikkauslujuuden mitoitusarvo

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,0,k} = \frac{0,8}{1,25} * 2,5 \text{ N/mm}^2 = 1,60 \text{ N/mm}^2$$

Pitkittäiskerroksen leikkauslujuuden mitoitusehto

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} = 0,101 \text{ N/mm}^2 \leq 1,60 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 6,3 \%}$$

1.5 Puristuskestävyys kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaanKuva L2.3 Tehollinen pinta-ala ja kerroin $k_{c,90}$.

Suurin puristusjännitys sijaitsee reuna-alueella $\Rightarrow k_{c,90} = 1,4$

Tehollisessa pinta-alassa huomioidaan vain seinän pitkittäiskerrokset sekä tehollisen pinta-alan kasvattaminen. Seinän pitkittäiskerrosten paksuus liitteen 4 mukaisesti.

$$\Rightarrow A_{eff} = (20 \text{ mm} + 20 \text{ mm} + 20 \text{ mm} + 30 \text{ mm}) * 1000 \text{ mm} = 90000 \text{ mm}^2$$

Puristusvoima tuella yhtä suuri kuin aiemmin laskettu leikkausvoiman mitoitusarvo

$$\Rightarrow N_{90,d} = V_d = 17,888 \text{ kN}$$

Puristusjännityksen mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{90,d}}{k_{c,90} A_{eff}} = \frac{17888 \text{ N}}{1,4 * 90000 \text{ mm}^2} = 0,142 \text{ N/mm}^2$$

Rakenteen puristuslujuuden mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{c,90,k} = \frac{0,8}{1,25} * 3,0 \text{ N/mm}^2 = 1,92 \text{ N/mm}^2$$

Kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan esiintyvän puristuksen mitoitusehto

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d} = 0,142 \text{ N/mm}^2 \leq 1,92 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 7,4 \%}$$

2. Käyttörajatila

Käyttöluokka 1 $\Rightarrow k_{def} = 0,8$

Muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin $\psi_2 = 0,3$

Hetkellisen taipuman raja $L/400$, lopullisen taipuman raja $L/300$

2.1 Taipuma Gamma-menetelmän mukaan

Tehollinen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa

$$EI_{eff,0} = 11550 \text{ N/mm}^2 * 6,637 * 10^8 \text{ mm}^4 = 7,666 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Hetkellinen taipuma pysyvistä kuormista

$$w_{inst,g} = \frac{5 g_k L^4}{384 EI_{eff,0}} = \frac{5 * 2,50 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^4}{384 * 7,666 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 3,611 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma muuttuvista kuormista

$$w_{inst,q} = \frac{5 q_k L^4}{384 EI_{eff,0}} = \frac{5 * 2,50 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^4}{384 * 7,666 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 3,611 \text{ mm}$$

Hetkellinen kokonaistaipuma

$$w_{inst} = w_{inst,g} + w_{inst,q} = 3,611 \text{ mm} + 3,611 \text{ mm} = 7,222 \text{ mm}$$

Lopputilan taipuma

$$w_{fin} = w_{inst,g}(1 + k_{def}) + w_{inst,q}(1 + \psi_2 k_{def})$$

$$= 3,611 \text{ mm} * (1 + 0,8) + 3,611 \text{ mm} * (1 + 0,3 * 0,8) = 10,978 \text{ mm}$$

Hetkellisen taipuman mitoitusehto

$$w_{inst} \leq L/400 = 7,222 \text{ mm} \leq 13,500 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 53,5 \%}$$

Lopputilan taipuman mitoitusehto

$$w_{fin} \leq L/300 = 10,978 \text{ mm} \leq 18,0 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 61,0 \%}$$

2.2 Taipuma leikkausanalogian mukaan**Taivutusjäykkyys**

$$EI = 8,733 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Tehollinen leikkausjäykkyys

$$GA_{eff} = \frac{h_s^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2 G_1 b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2 G_n b} \right) \right]}$$

$$= \frac{(210 \text{ mm})^2}{\left(2 \left(\frac{30 \text{ mm}}{2 * 690 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm}} \right) + 3 \left(\frac{40 \text{ mm}}{65 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm}} \right) \right)}$$

$$+ \frac{(210 \text{ mm})^2}{2 \left(\frac{30 \text{ mm}}{690 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm}} \right)} = 2,231 * 10^7 \text{ N}$$

Hetkellinen taipuma pysyvistä kuormista

$$w_{inst,g} = \frac{5 g_k L^4}{384 EI_0} + \frac{g_k L^2}{8 GA_{eff}}$$

$$= \frac{5 * 2,50 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^4}{384 * 8,733 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} + \frac{2,50 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^2}{8 * 2,231 * 10^7 \text{ N}} = 3,578 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma muuttuvista kuormista

$$w_{inst,q} = \frac{5 q_k L^4}{384 EI_0} + \frac{q_k L^2}{8 GA_{eff}}$$

$$= \frac{5 * 2,50 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^4}{384 * 8,733 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} + \frac{2,50 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^2}{8 * 2,231 * 10^7 \text{ N}} = 3,578 \text{ mm}$$

Hetkellinen kokonaistaipuma

$$w_{inst} = w_{inst,g} + w_{inst,q} = 3,578 \text{ mm} + 3,578 \text{ mm} = 7,156 \text{ mm}$$

Lopputilan taipuma

$$w_{fin} = w_{inst,g}(1 + k_{def}) + w_{inst,q}(1 + \psi_2 k_{def})$$

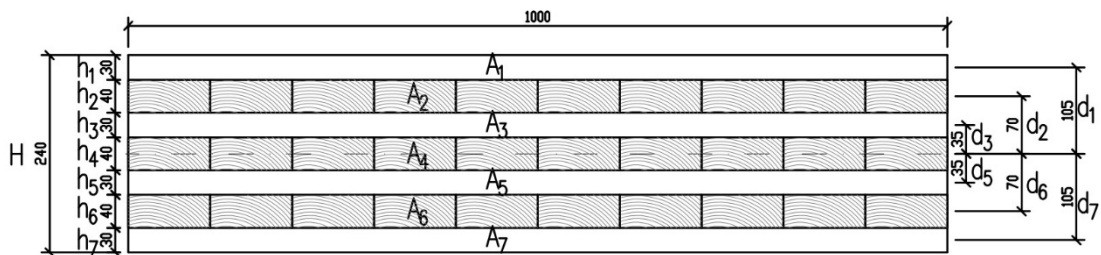
$$= 3,578 \text{ mm} * (1 + 0,8) + 3,578 \text{ mm} * (1 + 0,3 * 0,8) = 10,877 \text{ mm}$$

Hetkellisen taipuman mitoitusehto

$$w_{inst} \leq L/400 = 7,156 \text{ mm} \leq 13,500 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste } 53,0 \%$$

Lopputilan taipuman mitoitusehto

$$w_{fin} \leq L/300 = 10,877 \text{ mm} \leq 18,0 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste } 60,4 \%$$

2.3 Värähtely Suomen kansallisen liitteen menetelmän mukaan

Kuva L2.4 Mitoitettava CLT-rakenne.

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_2 = A_4 = 40 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 40000 \text{ mm}^2$$

Levyjen väliset liitokset ovat nivelellisiä, joten jännevälinä poikittaissuunnassa

käytetään yhden levyn leveyttä. Oletetaan leveydeksi $B_L = 2,0 \text{ m}$

Huoneen leveys $B_h = 6,0 \text{ m}$.

Liitoksen hyötysuhdekerroin poikittaissuunnassa γ_2

$$\gamma_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 E_2 A_2}{B_L^2} \frac{h_3}{G_R B} \right)}$$

$$= \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 * 11550 \text{ N/mm}^2 * 40000 \text{ mm}^2}{(2000 \text{ mm})^2} \frac{30 \text{ mm}}{65 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm}} \right)} = 0,655$$

Tehollinen neliömomentti poikittaissuunnassa

$$I_{eff,90} = \sum_{i=1}^n (I_i + \gamma_i A_i d_i^2)$$

$$I_{eff,90} = 3 \left(\frac{1000 \text{ mm} * (40 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2 (0,655 * 40000 \text{ mm}^2 * (70 \text{ mm})^2)$$

$$= 2,729 * 10^8 \text{ mm}^4$$

CLT:n tehollinen taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa

$$EI_{eff,90} = 11550 \text{ N/mm}^2 * 2,729 * 10^8 \text{ mm}^4 = 3,152 * 10^6 \text{ Nm}^2$$

Pintavalun taivutusjäykkyys

$$\text{Pintavalun kimmomoduuli } E = 17000 \text{ N/mm}^2$$

$$EI_c = 17000 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (50 \text{ mm})^3}{12} = 1,771 * 10^5 \text{ Nm}^2$$

Koko rakenteen tehollinen taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa pintavalu huomioiden

$$EI_{eff,B} = EI_{eff,90} + EI_c = 3,152 * 10^6 \text{ Nm}^2 + 1,771 * 10^5 \text{ Nm}^2$$

$$= 3,329 * 10^6 \text{ Nm}^2$$

Koko rakenteen tehollinen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa pintavalu huomioiden

$$EI_{eff,L} = EI_{eff,0} + EI_c = 7,666 * 10^6 \text{ Nm}^2 + 1,771 * 10^5 \text{ Nm}^2$$

$$= 7,843 * 10^6 \text{ Nm}^2$$

Lattiarakenteen massa ja 30 kg/m² osuus hyötykuormasta

$$m_q = \frac{2500 \text{ N/m}^2}{9,81 \text{ m/s}^2} + 30 \text{ kg/m}^2 = 284,84 \text{ kg/m}^2$$

Lattiarakenteen alin ominaistajuuus

$$f_1 = \frac{\pi}{2 L^2} \sqrt{\frac{EI_{eff,L}}{m_q}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{L}{B_h} \right)^2 + \left(\frac{L}{B_h} \right)^4 \right] \frac{EI_{eff,B}}{EI_{eff,L}}}$$

$$= \frac{\pi}{2 (5,4 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{7,843 * 10^6 \text{ Nm}^2}{284,84 \text{ kg/m}^2}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{5,4 \text{ m}}{6 \text{ m}} \right)^2 + \left(\frac{5,4 \text{ m}}{6 \text{ m}} \right)^4 \right] \frac{3,329 * 10^6 \text{ Nm}^2}{7,843 * 10^6 \text{ Nm}^2}}$$

$$= 12,525 \text{ Hz}$$

Alimman ominaistajuuden vaatimus

$$f_1 \geq 9 \text{ Hz} \Rightarrow 12,525 \text{ Hz} \geq 9 \text{ Hz} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 71,9 \%}$$

Taipumarajan korotuskerroin pienissä huoneissa

$$k_L = \frac{1}{0,318 + 0,114 L_1} \geq 1 = \frac{1}{0,318 + 0,114 * 6 \text{ m}} = 0,998 \geq 1 \Rightarrow 1$$

Poikittaisjäykkyyden huomioiva apukerroin

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{EI_{eff,B}}{EI_{eff,L}}} \leq \frac{B_h}{L} = \sqrt[4]{\frac{3,329 * 10^6 \text{ Nm}^2}{7,843 * 10^6 \text{ Nm}^2}} \leq \frac{6 \text{ m}}{5,4 \text{ m}} = 0,8072 \leq 1,111 \Rightarrow 0,8072$$

Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma

$$\delta = \min \begin{cases} \delta = \frac{F L^2}{42 k_\delta EI_{eff,L}} k_L \\ \delta = \frac{F L^3}{48 B EI_{eff,L}} k_L \end{cases} = \min \begin{cases} \delta = \frac{1000 \text{ N} * (5,4 \text{ m})^2}{42 * 0,8072 * 7,843 * 10^6 \text{ Nm}^2} \\ \delta = \frac{1000 \text{ N} * (5,4 \text{ m})^3}{48 * 1,0 \text{ m} * 7,843 * 10^6 \text{ Nm}^2} \end{cases}$$

$$= \min \begin{cases} 0,110 \text{ mm} \\ 0,418 \text{ mm} \end{cases} = 0,110 \text{ mm}$$

Pistekuorman aiheuttaman hetkellisen taipuman vaatimus

$$\delta \leq 0,5 \text{ mm} \Rightarrow 0,110 \text{ mm} \leq 0,5 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 21,9 \%}$$

2.4 Värähtely Wallner-Novak et al. mukaan

Mitoitetaan rakenne yhteen suuntaan kantavana, värähtelyluokassa 1.

Taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa

$$EI_{90} = \sum_{i=1}^n E_i \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i d_i^2$$

$$= 3 \left(11550 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (40 \text{ mm})^3}{12} \right)$$

$$+ 2 (11550 \text{ N/mm}^2 * 40000 \text{ mm}^2 * (70 \text{ mm})^2) = 4,712 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Koko rakenteen taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa pintavalu huomioiden

$$EI_B = EI_{90} + EI_c = 4,712 * 10^6 \text{ Nm}^2 + 1,771 * 10^5 \text{ Nm}^2 = 4,890 * 10^6 \text{ Nm}^2$$

Taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa

$$EI_0 = 11550 \text{ N/mm}^2 * 7,440 * 10^8 \text{ mm}^4 = 8,593 * 10^6 \text{ Nm}^2$$

Koko rakenteen tehollinen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa pintavalu huomioiden

$$EI_L = EI_0 + EI_c = 8,593 * 10^6 \text{ Nm}^2 + 1,771 * 10^5 \text{ Nm}^2 = 8,770 * 10^6 \text{ Nm}^2$$

Lattiarakenteen massa

$$m_0 = \frac{2500 \text{ N/m}^2}{9,81 \text{ m/s}^2} = 254,84 \text{ kg/m}^2$$

Lattiarakenteen alin ominaistajuus

$$f_1 = \frac{\pi}{2 L^2} \sqrt{\frac{EI_L}{m_0}}$$

$$f_1 = \frac{\pi}{2 (5,4 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{8,770 * 10^6 \text{ Nm}^2}{254,84 \text{ kg/m}^2}} = 9,99 \text{ Hz}$$

Alimman ominaistajuuden vaatimus

$$f_1 \geq 9 \text{ Hz} \Rightarrow 9,99 \text{ Hz} \geq 8 \text{ Hz} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 80,1 \%}$$

Rakenteen tehollinen leveys

$$b_{eff} = \min \left\{ \frac{L}{1,1} \sqrt[4]{\frac{EI_B}{EI_L}}; B_h \right\} = \min \left\{ \frac{5,4 \text{ m}}{1,1} \sqrt[4]{\frac{4,890 * 10^6 \text{ Nm}^2}{8,770 * 10^6 \text{ Nm}^2}}; 6 \text{ m} \right\}$$

$$= 4,242 \text{ m}$$

Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma poikittainen jäykkyys huomioiden

$$\delta = \frac{F L^3}{48 EI_L b_{eff}} = \frac{1000 \text{ N} * (5,4 \text{ m})^3}{48 * 8,770 * 10^6 \text{ Nm}^2 * 4,242 \text{ m}} = 0,088 \text{ mm}$$

Pistekuorman aiheuttaman hetkellisen taipuman vaatimus

$$\delta \leq 0,25 \text{ mm} \Rightarrow 0,088 \text{ mm} \leq 0,25 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 35,2 \%}$$

Ominaistajuuden huomioiva kerroin

$$a_f = e^{-0,4 f_1} = e^{(-0,40 * 9,99 \text{ Hz})} = 0,0184$$

Modaalimassa

$$M = m_0 \frac{L}{2} b_{eff} = 254,84 \text{ kg/m}^2 * \frac{5,4 \text{ m}}{2} * 4,242 \text{ m} = 2918,8 \text{ kg}$$

Henkilön kävelystä rakenteeseen syntyvä kiihtyvyys

$$a_{rms} = \frac{0,4 a_f F_0}{M 2 D} = \frac{0,4 * 0,0184 * 700 \text{ N}}{2918,8 \text{ kg} * 2 * 0,04} = 0,022 \text{ m/s}^2$$

Kiihtyvyyden vaatimus

$$a_{rms} \leq 0,05 \text{ m/s}^2 \Rightarrow 0,022 \text{ m/s}^2 \leq 0,05 \text{ m/s}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 44,0 \%}$$

2.3 Värähtely Canadian CLT Handbookin mukaan**Pelkän CLT-levyn massa**

$$m_0 = \frac{1200 \text{ N/m}^2}{9,81 \text{ m/s}^2} = 122,32 \text{ kg/m}^2$$

Rakenteen suurin sallittu jänneväli

$$L \leq 0,11 \frac{EI^{0,29}}{m^{0,12}} = 0,11 * \frac{(8,593 * 10^6 \text{ Nm}^2)^{0,29}}{(122,32 \text{ kg/m}^2)^{0,12}} = 6,336 \text{ m}$$

$$\Rightarrow 5,4 \text{ m} \leq 6,365 \text{ m} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 85,2 \%}$$

Pintakerroksen massa alle kaksinkertainen CLT-levyyn verrattuna, joten sallitusta jännevälistä ei tarvitse tehdä vähennyksiä.

3. Palomitoitus

Välipohjarakenteelta vaadittava palonkesto aika on 30 minuuttia. Hiiltymisnopeuden perusnopeutena käytetään 0,65 mm/min.

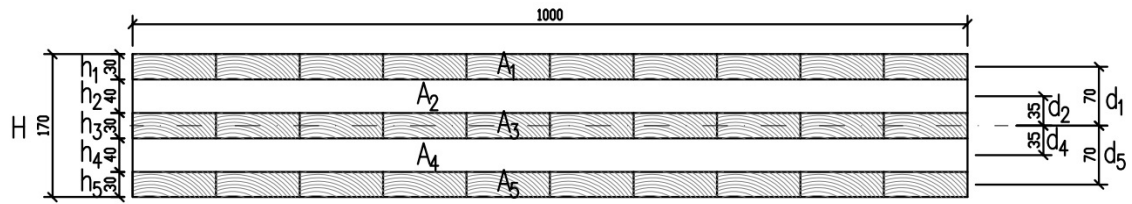
Hiiltymissyvyys

$$d_{char,0} = \beta_0 t = 0,65 \text{ mm/min} * 30 \text{ min} = 19,5 \text{ mm}$$

Teoreettinen lujuuden ja jäykkyyden menettänyt kerros

$$d_{eff} = d_{char,0} + k_0 d_0 = 19,5 \text{ mm} + 1,0 * 7 \text{ mm} \approx 27 \text{ mm}$$

Ulointa pitkittäiskerrosta jää jäljelle 30 mm – 27 mm = 3 mm. Kerros on niin ohut, ettei sitä voida ottaa laskelmissa huomioon. Tällöin myöskään hiiltymisen puoleista poikkitaikeroista ei voida huomioida.



Kuva L2.5 Hiiltymisen jälkeen jäljelle jäävä poikkileikkaus.

Ehjien lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala syysuunnassa

$$A_1 = A_3 = A_5 = 30 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 30000 \text{ mm}^2$$

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala kohtisuoraa syysuuntaa vastaan

$$A_2 = A_4 = 40 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 40000 \text{ mm}^2$$

3.1 Taivutuskestävyys leikkausanalogian mukaan

Palotilanteen kimmomoduulit

$$E_0 = 9625 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 11069 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{90} = 375 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 431 \text{ N/mm}^2$$

Taivutusjäykkyys

$$EI_0 = EI_A + EI_B = \sum_{i=1}^n E_i \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i d_i^2$$

$$\begin{aligned} EI_A &= 3 \left(11069 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (30 \text{ mm})^3}{12} \right) \\ &\quad + 2 \left(431 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (40 \text{ mm})^3}{12} \right) \\ &= 7,931 * 10^{10} \text{ Nmm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI_B &= 2(11069 \text{ N/mm}^2 * 30000 \text{ mm}^2 * (70 \text{ mm})^2) \\ &\quad + 2(431 \text{ N/mm}^2 * 40000 \text{ mm}^2 * (35 \text{ mm})^2) \\ &= 3,297 * 10^{12} \text{ Nmm}^2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow EI_0 = 3,376 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Taivutusmomentin mitoitusarvo palotilanteessa

$$\begin{aligned}
 M_d &= \frac{(1,0 g_k + \psi_2 q_k) * L^2}{8} \\
 &= \frac{(1,0 * 2,50 \text{ kN/m} + 0,3 * 2,50 \text{ kN/m}) * (5,4 \text{ m})^2}{8} = 11,846 \text{ kNm} \\
 &= 11,846 * 10^6 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

Taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\begin{aligned}
 \sigma_{m,d} &= M_d \frac{H}{2} \frac{E_1}{EI_0} = 11,846 * 10^6 \text{ Nmm} * \frac{170 \text{ mm}}{2} * \frac{11069 \text{ N/mm}^2}{3,376 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} \\
 &= 3,301 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo palotilanteessa

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{m,k} k_{fi} k_{sys} = \frac{1,0}{1,0} * 24,0 \text{ N/mm}^2 * 1,15 * 1,2 = 33,12 \text{ N/mm}^2$$

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 3,301 \text{ N/mm}^2 \leq 33,12 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 10,0 \%}$$

3.2 Tasoa vastaan kohtisuora leikkauskestävyys**Staattiset momentit**

$$\begin{aligned}
 S_R &= \sum_{i=1}^{n_L} B h_i d_i = 1000 \text{ mm} * 30 \text{ mm} * 70 \text{ mm} = 2100000 \text{ mm}^3 \\
 S_0 &= \sum_{i=1}^{n_L} B h_i d_i + \frac{B h_n d_n}{2} = 2100000 \text{ mm}^3 + \frac{1000 \text{ mm} * 30 \text{ mm} * 7,5 \text{ mm}}{2} \\
 &= 2212500 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Pitkittäiskerrostien neliömomentti

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \sum_{i=1}^n (I_i + A_i d_i^2) = 3 \left(\frac{1000 \text{ mm} * (30 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2(30000 \text{ mm}^2 * (70 \text{ mm})^2) \\
 &= 300750000 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Leikkausvoiman mitoitusarvo palotilanteessa

$$V_d = \frac{(1,0 g_k + \psi_2 q_k) L}{2}$$

$$= \frac{(1,0 * 2,50 \text{ kN/m} + 0,3 * 2,5 \text{ kN/m}) * 5,4 \text{ m}}{2} = 8,775 \text{ kN}$$

Vierintäleikkausjännityksen mitoitusarvo poikittaiskerroksessa

$$\tau_{v,R,d} = \frac{V_d S_R}{I_0 B} = \frac{8775 \text{ N} * 2100000 \text{ mm}^3}{300750000 \text{ mm}^4 * 1000 \text{ mm}} = 0,061 \text{ N/mm}^2$$

Vierintäleikkauslujuuden mitoitusarvo palotilanteessa

$$f_{v,R,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{v,R,k} k_{fi} = \frac{1,0}{1,0} * 1,1 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 1,265 \text{ N/mm}^2$$

Vierintäleikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{v,R,d} \leq f_{v,R,d} = 0,061 \text{ N/mm}^2 \leq 1,265 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 4,8 \%}$$

Leikkausjännityksen mitoitusarvo pitkittäiskerroksessa

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d S_0}{I_0 B} = \frac{8775 \text{ N} * 2212500 \text{ mm}^3}{300750000 \text{ mm}^4 * 1000 \text{ mm}} = 0,065 \text{ N/mm}^2$$

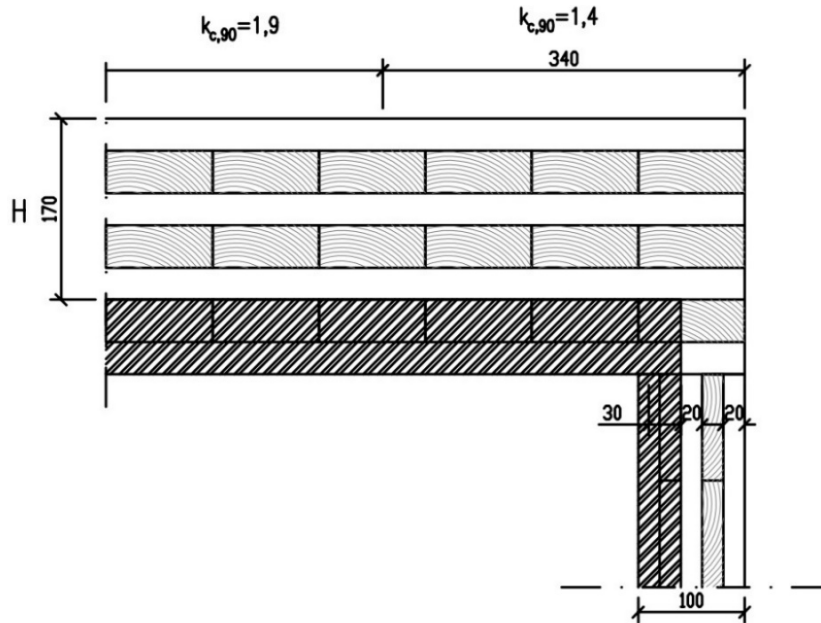
Pitkittäiskerroksen leikkauslujuuden mitoitusarvo palotilanteessa

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{v,0,k} k_{fi} = \frac{1,0}{1,0} * 2,5 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 2,875 \text{ N/mm}^2$$

Pitkittäiskerroksen leikkauslujuuden mitoitusehto

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} = 0,065 \text{ N/mm}^2 \leq 2,875 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 2,3 \%}$$

3.3 Puristuskestävyys kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan



Kuva L2.6 Tehollinen pinta-ala ja kerroin $k_{c,90}$ hiiltymisen jälkeen.

Suurin puristusjännitys sijaitsee reuna-alueella

$$\Rightarrow k_{c,90} = 1,4$$

Tehollisessa pinta-alassa tulee huomioida seinän hiiltyminen. Tällöin voidaan huomioida vain seinän kaksi jäljelle jäävää pystylamellikerrosta. Lisäksi huomioidaan tehollisen pinta-alan kasvattaminen 30 mm:llä

$$\Rightarrow A_{eff} = (20 \text{ mm} + 20 \text{ mm} + 30 \text{ mm}) * 1000 \text{ mm} = 70000 \text{ mm}^2$$

Puristusvoima tuella yhtä suuri kuin aiemmin laskettu leikkausvoiman mitoitusarvo

$$\Rightarrow N_{90,d} = V_d = 8,775 \text{ kN}$$

Puristusjännityksen mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{90,d}}{k_{c,90} A_{eff}} = \frac{8775 \text{ N}}{1,4 * 70000 \text{ mm}^2} = 0,090 \text{ N/mm}^2$$

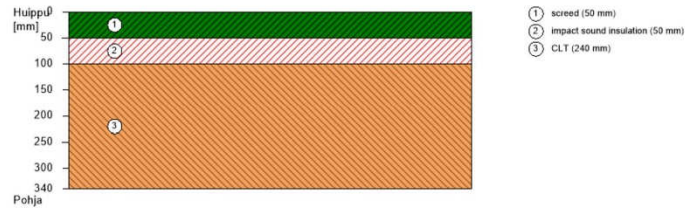
Rakenteen puristuslujuuden mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan palotilanteessa

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{c,90,k} k_{fi} = \frac{1,0}{1,0} * 3,0 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 3,45 \text{ N/mm}^2$$

Kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan esiintyvän puristuksen mitoitusehto

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d} = 0,090 \text{ N/mm}^2 \leq 3,45 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 2,6 \%}$$

Järjestelmä



Kerrokset

Huippu

flooring	***disable Flooring	✓
screed		
Paksuus	50	mm
Tiheys	2300	kg/m³
impact sound insulation		
Paksuus	50	mm
Jäykkyys	10	MN/m³

Päärakenne

CLT

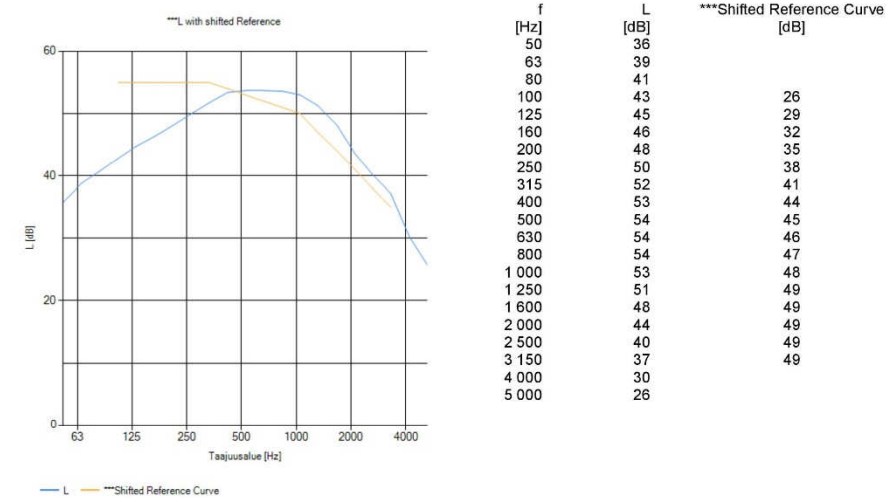
Pohja

***Impact Sound Level Results

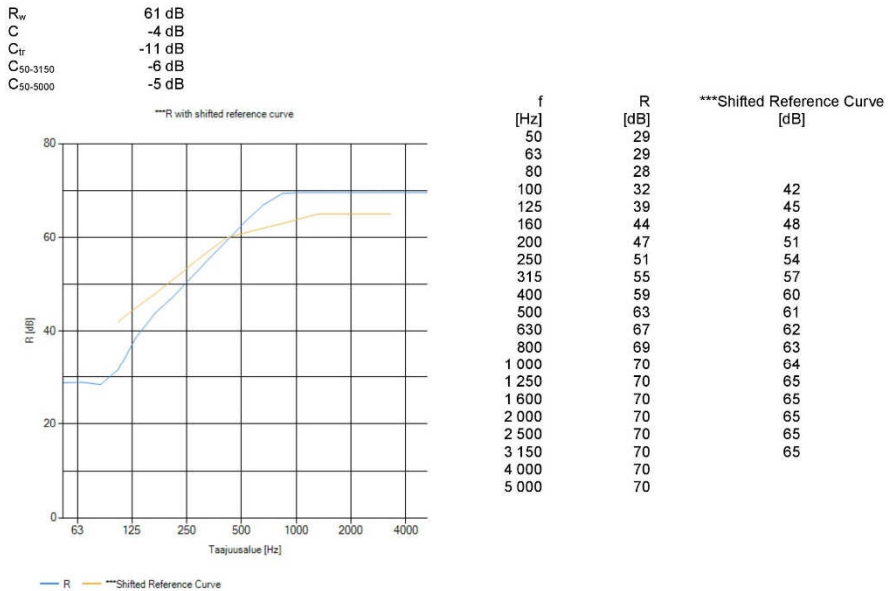
L_{nw}	53 dB
C_1	-6 dB
$C_{50-2500}$	-6 dB



Kuva L2.7 Välipohjan ääneneristävyyyslaskelmat.



***Airborne Sound Insulation Results



Viiteasiakirjat tätä analyysia varten

Arvonimi englanniksi	Kuvaus
SEAP Project Report_02	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): PILOT STUDY
SEAP Project Report_03	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): Accuracy evaluations
SEAP Project Report_04	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): Calculation Model



Kuva L2.8 Välipohjan ääneneristävyytlaskelmat.

Arto Koski Projekti Elementti Diplomityö Välipohja Sivu 3 Päivämäärä 30.05.2021

Viiteasiakirjat tätä analyysiä varten	
Arvonimi englanniksi	Kuvaus
SEAP Project Report_05	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): LABORATORY MEASUREMENTS FOR SEVERAL CONSTRUCTIONS FOR STORA ENSO WOOD PRODUCTS ACCORDING TO SS-EN ISO 10140-2:2010 AND 10140-3:2010
SEAP Project Report_07	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): SMALL-SCALE MEASUREMENTS OF FLOOR PACKAGES
SEAP Project Report_08	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): INTERPRETATION OF RESULTS FROM LABORATORY MEASUREMENTS OF AIRBORNE SOUND INSULATION AND IMPACT SOUND LEVEL
SEAP Project Report_01	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): REGULATIONS

Vastuuvapauslauseke

Ohjelmisto on suunniteltu auttamaan insinöörejä heidän jokapäiväisessä työssään. Ohjelmiston käyttäjien tulee olla taitavia ja kokeneita insinöörejä, joilla on laajaymmärrys rakennesuunnittelusta ja puurakenteisiin liittyvästä rakennusfysiikasta, sillä ohjelmiston tarkoituksena on avustaa vaikeissa rakennesuunnitteluun ja rakennusfysiikkaan liittyvissä tehtävissä. Ohjelmiston käyttäjä on velvollinen tarkastamaan kaikki ohjelmistoon syötetyt arvot ja tulosten virheettömyys riippumatta siitä, onko käyttäjä syöttänyt arvot ohjelmistoon itse tai onko arvot ohjelmistoon valmiiksi syötettyjä oletusarvoja. Ohjelmiston tulosten perusteella ei tule tehdä päätöksiä tai toimenpiteitä. Ohjelmiston tulosten käyttö on sallittua vasta kun projektin rakennusuunnittelusta/rakennusfysiikasta vastaava insinööri on tarkastanut tulokset ja hyväksynyt ne oikeiksi ja täydelliseksi. Käyttäjällä on mahdollisuus tulostaa otteita ohjelmistosta, mutta näitä otteita ei saa muokata.

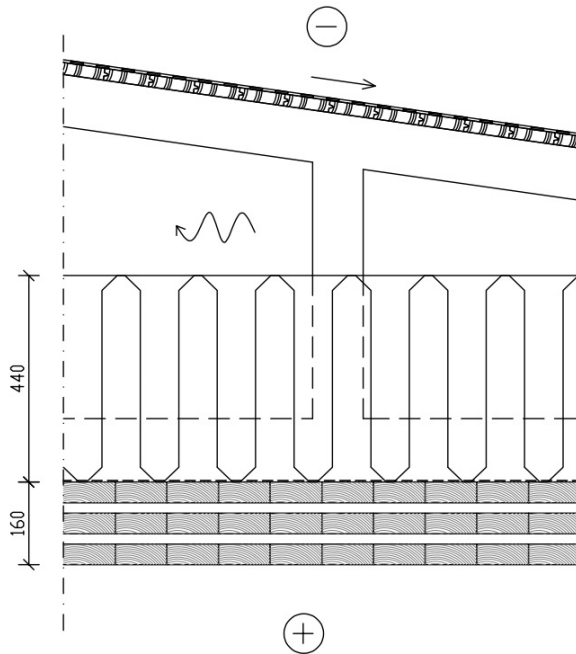
Stora Enso Wood Products GmbH ei anna mitään takuuta tai vakuutusta ohjelmistoon liittyen. Huolimatta siitä, että ohjelmisto on kehitetty mahdollisimman huolellisesti, Stora Enso Wood Products GmbH ei anna suoraan tai epäsuoraan minkäänlaista vakuutusta tai hyväksy minkäänlaista vastuuta ohjelmistolla tuotetun informaation tai datan tarkkuudesta, voimassapilausta, oikea-aikaisuudesta tai täydellisyydestä. Stora Enso Wood Products GmbH ei myöskään anna minkäänlaista vakuutusta tai hyväksy vastuuta ohjelmiston yleisestä käytettävyydestä, sen sopivuudesta johonkin erityiseen tarkoitukseen tai yhteensopivuudesta kolmansien osapuolten tuottamien tai toimittamien ohjelmistojen kanssa.

Stora Enso Wood Products GmbH on vastuussa ainoastaan vahingoista, jotka se on aiheuttanut törkeällä tuottamuksellaan tai tahallisesti. Näin ollen Stora Enso Wood Products GmbH ei vastaa tuottamuksellisesti aiheutetuista vahingoista, paitsi milloin kyseessä on henkilön kohdistunut vahinko. Aikaisemmin lueteltujen ehtojen mukaisesti Stora Enso Wood Products GmbH ei ole vastuussa ohjelmiston toiminnasta tai käyttäjän datan tai ohjelmistojen menettämisestä.

Sovellettava laki: Näihin ehtoihin sovelletaan Itävallan lakia, lukuun ottamatta sen kansainvälistä lainvalintaa koskevia säännöksiä ja YK:n kansainvälistä kauppalakia (CISG).



Yläpohjan jänneväli $L=5,4$ metriä. Tarkastellaan rakenne yksiaukkoisena, päistään nivelellisesti tuettuna ja yhteen suuntaan kantavana rakenteena. Mitoitus suoritetaan 1,0 metrin levyisenä kaistana. Materiaaliarvoina käytetään luvun 3 taulukon 1 mukaisia arvoja.



Kuva L3.1 Tarkasteltava yläpohjarakenne.

Pysyvät kuormat

CLT omapaino $0,8 \text{ kN/m}^2$

Muiden rakenneosien omapaino $0,8 \text{ kN/m}^2$

Omapaino metrin kaistaa kohden $g_k = 0,8 \text{ kN/m} + 0,8 \text{ kN/m} = 1,6 \text{ kN/m}$

Muuttuvat kuormat

Lumikuorma katolla $2,0 \text{ kN/m}^2$

Lumikuorma metrin kaistaa kohden $q_k = 2,0 \text{ kN/m}$

Taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa

$$\begin{aligned}
 M_d &= \frac{(1,15 g_k + 1,5 q_k) * L^2}{8} \\
 &= \frac{(1,15 * 1,6 \text{ kN/m} + 1,5 * 2,0 \text{ kN/m}) * (5,4 \text{ m})^2}{8} = 17,642 \text{ kNm} \\
 &= 17,642 * 10^6 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

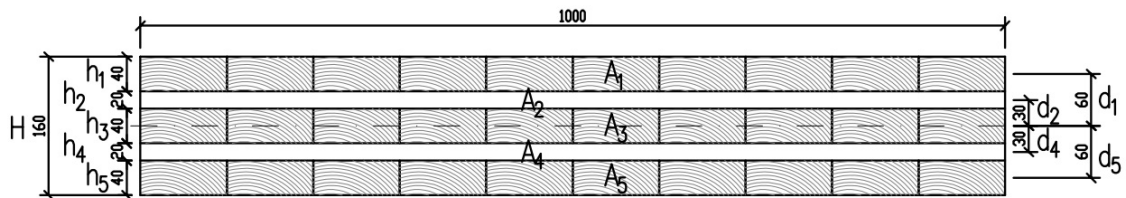
Leikkausvoiman mitoitusarvo

$$V_d = \frac{(1,15 g_k + 1,5 q_k) L}{2}$$

$$= \frac{(1,15 * 1,6 \text{ kN/m} + 1,5 * 2,0 \text{ kN/m}) * 5,4 \text{ m}}{2} = 13,068 \text{ kN}$$

Keskipitkä aikaluokka

$$\Rightarrow k_{\text{mod}} = 0,8$$

1. Murtorajatila**1.1 Taivutuskestävyyden mitoitus Gamma-menetelmän mukaan**

Kuva L3.2 Mitoitettava CLT-poikkileikkaus.

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_1 = A_3 = A_5 = 40 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 40000 \text{ mm}^2$$

Etäisyys lamellikerrosten keskipisteestä poikkileikkauksen keskipisteeseen

$$d_1 = d_5 = 60 \text{ mm}$$

Liitoksen hyötysuhdekerroin γ_1

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 E_1 A_1}{L^2} \frac{h_2}{G_R B} \right)}$$

$$= \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 * 11550 \text{ N/mm}^2 * 40000 \text{ mm}^2}{(5400 \text{ mm})^2} \frac{20 \text{ mm}}{65 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm}} \right)} = 0,9541$$

Tehollinen neliömomentti

$$I_{eff,0} = \sum_{i=1}^n (I_i + \gamma_i A_i d_i^2)$$

$$I_{eff,0} = 3 \left(\frac{1000 \text{ mm} * (40 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2 (0,9541 * 40000 \text{ mm}^2 * (60 \text{ mm})^2)$$

$$= 290780800 \text{ mm}^4$$

Taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\begin{aligned}\sigma_{m,d} &= \frac{M_d}{I_{eff,0}} (\gamma_1 d_1 + 0,5 h_1) \\ &= \frac{17,642 * 10^6 \text{ Nmm}}{290780800 \text{ mm}^4} (0,9541 * 60 \text{ mm} + 0,5 * 40 \text{ mm}) \\ &= 4,687 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{m,k} k_{sys} = \frac{0,8}{1,25} * 24,0 \text{ N/mm}^2 * 1,2 = 18,432 \text{ N/mm}^2$$

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 4,687 \text{ N/mm}^2 \leq 18,432 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 25,4 \%}$$

1.2 Taivutuskestävyyden mitoitus Wallner-Novak et al. mukaan

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala syysuunnassa

$$A_1 = A_3 = A_5 = 40 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 40000 \text{ mm}^2$$

Etäisyys lamellikerrosten keskipisteestä poikkileikkauksen keskipisteeseen

$$d_1 = d_5 = 60 \text{ mm}$$

Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus

$$H = 160 \text{ mm}$$

Pitkittäiskerrosten neliömomentti

$$\begin{aligned}I_0 &= \sum_{i=1}^n (I_i + A_i d_i^2) \\ I_0 &= 3 \left(\frac{1000 \text{ mm} * (40 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2 (40000 \text{ mm}^2 * (60 \text{ mm})^2) \\ &= 3,040 * 10^8 \text{ mm}^4\end{aligned}$$

Taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{I_0} (d_1 + 0,5 h_1)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{17,642 * 10^6 \text{ Nmm}}{3,040 * 10^8 \text{ mm}^4} (60 \text{ mm} + 0,5 * 40 \text{ mm}) \\
&= 4,643 \text{ N/mm}^2
\end{aligned}$$

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 4,643 \text{ N/mm}^2 \leq 18,432 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 25,2\%}$$

1.3 Taivutuskestävyyden mitoitus leikkausanalogian mukaan

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala syysuunnassa

$$A_1 = A_3 = A_5 = 40 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 40000 \text{ mm}^2$$

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala kohtisuoraa syysuuntaa vastaan

$$A_2 = A_4 = 20 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 20000 \text{ mm}^2$$

Etäisyys lamellikerrosten keskipisteestä poikkileikkauksen keskipisteeseen

$$d_1 = d_5 = 60 \text{ mm}, d_2 = d_4 = 30 \text{ mm}$$

Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus

$$H = 160 \text{ mm}$$

Taivutusjäykkyys

$$EI = EI_A + EI_B = \sum_{i=1}^n E_i \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i d_i^2$$

$$\begin{aligned}
EI_A &= 3 \left(11550 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (40 \text{ mm})^3}{12} \right) \\
&\quad + 2 \left(450 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (20 \text{ mm})^3}{12} \right) \\
&= 1,854 * 10^{11} \text{ Nmm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
EI_B &= 2 (11550 \text{ N/mm}^2 * 40000 \text{ mm}^2 * (60 \text{ mm})^2) \\
&\quad + 2 (450 \text{ N/mm}^2 * 20000 \text{ mm}^2 * (30 \text{ mm})^2) \\
&= 3,3426 * 10^{12} \text{ Nmm}^2
\end{aligned}$$

$$\Rightarrow EI = 3,528 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\begin{aligned}
\sigma_{m,d} &= M_d \frac{H}{2} \frac{E_1}{EI} = 17,642 * 10^6 \text{ Nmm} * \frac{160 \text{ mm}}{2} * \frac{11550 \text{ N/mm}^2}{3,528 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} \\
&= 4,620 \text{ N/mm}^2
\end{aligned}$$

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 4,620 \text{ N/mm}^2 \leq 18,432 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 25,1 \%}$$

1.4 Tasoa vastaan kohtisuora leikkauskestävyys**Staattiset momentit**

$$S_R = \sum_{i=1}^{n_L} B h_i d_i = 1000 \text{ mm} * 30 \text{ mm} * 60 \text{ mm} = 2400000 \text{ mm}^3$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n_L} B h_i d_i + \frac{B h_n d_n}{2} = 2400000 \text{ mm}^3 + \frac{1000 \text{ mm} * 40 \text{ mm} * 10 \text{ mm}}{2}$$

$$= 2600000 \text{ mm}^3$$

Vierintäleikkausjännityksen mitoitusarvo poikittaikerroksessa

$$\tau_{v,R,d} = \frac{V_d S_R}{I_0 B} = \frac{13068 \text{ N} * 2400000 \text{ mm}^3}{3,040 * 10^8 \text{ mm}^4 * 1000 \text{ mm}} = 0,103 \text{ N/mm}^2$$

Vierintäleikkauslujuuden mitoitusarvo

$$f_{v,R,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,R,k} = \frac{0,8}{1,25} * 1,1 \text{ N/mm}^2 = 0,704 \text{ N/mm}^2$$

Vierintäleikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{v,R,d} \leq f_{v,R,d} = 0,103 \text{ N/mm}^2 \leq 0,704 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 14,7 \%}$$

Leikkausjännityksen mitoitusarvo pitkittäikerroksessa

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d S_0}{I_0 B} = \frac{13068 \text{ N} * 2600000 \text{ mm}^3}{3,040 * 10^8 \text{ mm}^4 * 1000 \text{ mm}} = 0,112 \text{ N/mm}^2$$

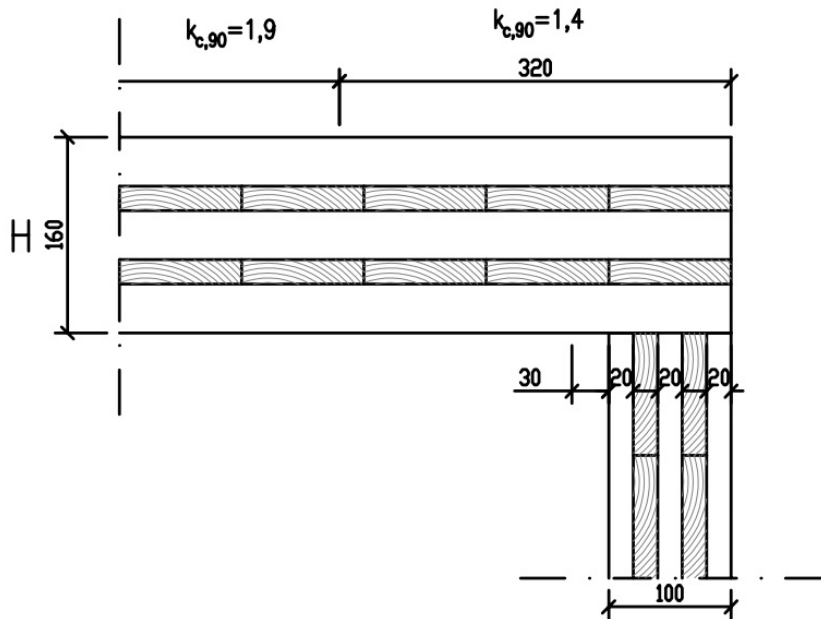
Pitkittäikerroksen leikkauslujuuden mitoitusarvo

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,0,k} = \frac{0,8}{1,25} * 2,5 \text{ N/mm}^2 = 1,60 \text{ N/mm}^2$$

Pitkittäikerroksen leikkauslujuuden mitoitusehto

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} = 0,112 \text{ N/mm}^2 \leq 1,60 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 7,0 \%}$$

1.5 Puristuskestävyys kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan



Kuva L3.3 Tehollinen pinta-ala ja kerroin $k_{c,90}$.

Suurin puristusjännitys sijaitsee reuna-alueella

$$\Rightarrow k_{c,90} = 1,4$$

Tehollisessa pinta-alassa huomioidaan vain seinän pitkittäiskerrokset sekä tehollisen pinta-alan kasvattaminen 30 mm:llä

$$\Rightarrow A_{\text{eff}} = (20 \text{ mm} + 20 \text{ mm} + 20 \text{ mm} + 30 \text{ mm}) * 1000 \text{ mm} = 90000 \text{ mm}^2$$

Puristusvoima tuella yhtä suuri kuin aiemmin laskettu leikkausvoiman mitoitusarvo

$$\Rightarrow N_{90,d} = V_d = 13,068 \text{ kN}$$

Puristusjännityksen mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{90,d}}{k_{c,90} A_{\text{eff}}} = \frac{13068 \text{ N}}{1,4 * 90000 \text{ mm}^2} = 0,104 \text{ N/mm}^2$$

Rakenteen puristuslujuuden mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} f_{c,90,k} = \frac{0,8}{1,25} * 3,0 \text{ N/mm}^2 = 1,92 \text{ N/mm}^2$$

Kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan esiintyvän puristuksen mitoitusehto

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d} = 0,104 \text{ N/mm}^2 \leq 1,92 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste } 5,4 \%$$

2. Käyttörajatila

Käyttöluokka 1 $\Rightarrow k_{\text{def}} = 0,8$

Muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin $\psi_2 = 0,3$

Hetkellisen taipuman raja $L/400$, lopullisen taipuman raja $L/300$

2.1 Taipuma Gamma-menetelmän mukaan

Tehollinen taivutusjäykkyys pitkittäissuunnassa

$$EI_{\text{eff},0} = 11550 \text{ N/mm}^2 * 290780800 \text{ mm}^4 = 3,359 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Hetkellinen taipuma pysyvistä kuormista

$$w_{\text{inst},g} = \frac{5 g_k L^4}{384 EI_{\text{eff},0}} = \frac{5 * 1,6 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^4}{384 * 3,359 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 5,274 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma muuttuvista kuormista

$$w_{\text{inst},q} = \frac{5 q_k L^4}{384 EI_{\text{eff},0}} = \frac{5 * 2,0 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^4}{384 * 3,359 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 6,592 \text{ mm}$$

Hetkellinen kokonaistaipuma

$$w_{\text{inst}} = w_{\text{inst},g} + w_{\text{inst},q} = 5,274 \text{ mm} + 6,592 \text{ mm} = 11,866 \text{ mm}$$

Lopputilan taipuma

$$\begin{aligned} w_{\text{fin}} &= w_{\text{inst},g}(1 + k_{\text{def}}) + w_{\text{inst},q}(1 + \psi_2 k_{\text{def}}) \\ &= 5,274 \text{ mm} * (1 + 0,8) + 6,592 \text{ mm} * (1 + 0,3 * 0,8) = 17,667 \text{ mm} \end{aligned}$$

Hetkellisen taipuman mitoitusehto

$$w_{\text{inst}} \leq L/400 = 8,786 \text{ mm} \leq 13,500 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste } 87,9 \%$$

Lopputilan taipuman mitoitusehto

$$w_{\text{fin}} \leq L/300 = 17,667 \text{ mm} \leq 18,000 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste } 98,2 \%$$

2.2 Taipuma leikkausanalogian mukaan

Taivutusjäykkyys

$$EI = 3,528 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Tehollinen leikkausjäykkyys

$$GA_{eff} = \frac{h_s^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2 G_1 b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2 G_n b} \right) \right]}$$

$$= \frac{(120 \text{ mm})^2}{\left(2 \left(\frac{40 \text{ mm}}{2 * 690 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm}} \right) + 2 \left(\frac{20 \text{ mm}}{65 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm}} \right) + \left(\frac{40 \text{ mm}}{690 \text{ N/mm}^2 * 1000 \text{ mm}} \right) \right)}$$

$$= 1,969 * 10^7 \text{ N}$$

Hetkellinen taipuma pysyvistä kuormista

$$w_{inst,g} = \frac{5 g_k L^4}{384 EI} + \frac{g_k L^2}{8 GA_{eff}}$$

$$= \frac{5 * 1,6 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^4}{384 * 3,528 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} + \frac{1,6 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^2}{8 * 1,969 * 10^7 \text{ N}} = 5,317 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma muuttuvista kuormista

$$w_{inst,q} = \frac{5 q_k L^4}{384 EI} + \frac{q_k L^2}{8 GA_{eff}}$$

$$= \frac{5 * 2,0 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^4}{384 * 3,528 * 10^{12} \text{ Nmm}^2} + \frac{2,0 \text{ N/mm} * (5400 \text{ mm})^2}{8 * 1,969 * 10^7 \text{ N}} = 6,647 \text{ mm}$$

Hetkellinen kokonaistaipuma

$$w_{inst} = w_{inst,g} + w_{inst,q} = 5,317 \text{ mm} + 6,647 \text{ mm} = 11,964 \text{ mm}$$

Lopputilan taipuma

$$w_{fin} = w_{inst,g}(1 + k_{def}) + w_{inst,q}(1 + \psi_2 k_{def})$$

$$= 5,317 \text{ mm} * (1 + 0,8) + 6,647 \text{ mm} * (1 + 0,3 * 0,8) = 17,813 \text{ mm}$$

Hetkellisen taipuman mitoitusehto

$$w_{inst} \leq L/400 = 11,964 \text{ mm} \leq 13,500 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 88,6 \%}$$

Lopputilan taipuman mitoitusehto

$$w_{fin} \leq L/300 = 17,813 \text{ mm} \leq 18,000 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 99,0 \%}$$

3. Palomitoitus

Välipohjarakenteelta vaadittava palonkesto aika on 30 minuuttia. Hiiltymisnopeuden perusnopeutena käytetään 0,65 mm/min.

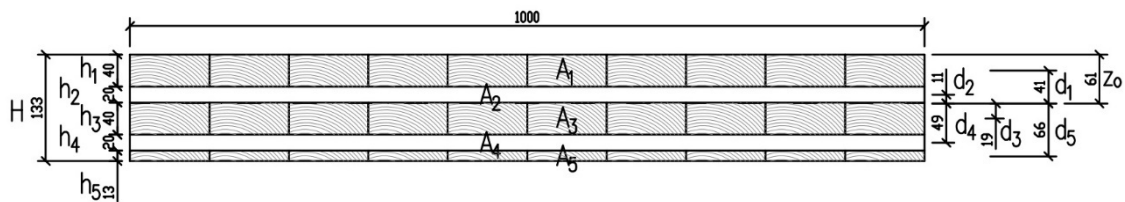
Hiiltymissyvyys

$$d_{char,0} = \beta_0 t = 0,65 \text{ mm/min} * 30 \text{ min} = 19,5 \text{ mm}$$

Teoreettinen lujuuden ja jäykkyyden menettänyt kerros

$$d_{eff} = d_{char,0} + k_0 d_0 = 19,5 \text{ mm} + 1,0 * 7 \text{ mm} \approx 27 \text{ mm}$$

Ulointa pitkittäiskerrosta jää jäljelle $40 \text{ mm} - 27 \text{ mm} = 13 \text{ mm}$. Kerroksen paksuus on yli 3 mm, jolloin se voidaan ottaa huomioon laskelmissa.



Kuva L3.4 Hiiltymisen jälkeen jäljelle jäävä poikkileikkaus.

Ehjien lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala syysuunnassa

$$A_1 = A_3 = 40 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 40000 \text{ mm}^2$$

Palolle altistuneen lamellikerroksen poikkileikkauksen pinta-ala syysuunnassa

$$A_5 = 13 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 13000 \text{ mm}^2$$

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala kohtisuoraa syysuuntaa vastaan

$$A_2 = A_4 = 20 \text{ mm} * 1000 \text{ mm} = 20000 \text{ mm}^2$$

Palotilanteen kimmomoduulit

$$E_0 = 9625 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 11069 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{90} = 375 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 431 \text{ N/mm}^2$$

Poikkileikkauksen painopiste

$$\frac{E_{1,3,5}}{E_c} = \frac{11069 \text{ N/mm}^2}{11069 \text{ N/mm}^2} = 1, \quad \frac{E_{2,4}}{E_c} = \frac{431 \text{ N/mm}^2}{11069 \text{ N/mm}^2} = 0,039$$

$$z_o = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} b_i d_i o_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} b_i d_i} = \frac{40000 \text{ mm}^2 * (20 + 80) \text{ mm} + 13000 \text{ mm}^2 * 127,5 \text{ mm}}{2 * 40000 \text{ mm}^2 + 13000 \text{ mm}^2} + \frac{0,039 * 20000 \text{ mm}^2 * (50 + 110) \text{ mm}}{0,039 * 2 * 20000 \text{ mm}^2} = 61,149 \text{ mm} \approx 61 \text{ mm}$$

Lamellikerrosten etäisyydet poikkileikkauksen painopisteestä

$$d_1 = 41 \text{ mm}, d_2 = 11 \text{ mm}, d_3 = 19 \text{ mm}, d_4 = 49 \text{ mm}, d_5 = 66 \text{ mm}$$

3.1 Taivutuskestävyys leikkausanalogian mukaan**Taivutusjäykkyys**

$$EI_0 = EI_A + EI_B = \sum_{i=1}^n E_i \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i d_i^2$$

$$EI_A = 2 \left(11069 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (40 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2 \left(431 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (20 \text{ mm})^3}{12} \right) + 11069 \text{ N/mm}^2 * \frac{1000 \text{ mm} * (13 \text{ mm})^3}{12}$$

$$= 1,207 * 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

$$EI_B = 11069 \text{ N/mm}^2 * 40000 \text{ mm}^2 * (41 \text{ mm})^2 + 431 \text{ N/mm}^2 * 20000 \text{ mm}^2 * (11 \text{ mm})^2 + 11069 \text{ N/mm}^2 * 40000 \text{ mm}^2 * (19 \text{ mm})^2 + 431 \text{ N/mm}^2 * 20000 \text{ mm}^2 * (49 \text{ mm})^2 + 11069 \text{ N/mm}^2 * 13000 \text{ mm}^2 * (66 \text{ mm})^2$$

$$= 1,620 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

$$\Rightarrow EI_0 = 1,553 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Taivutusmomentin mitoitusarvo palotilanteessa

$$M_d = \frac{(1,0 g_k + \psi_2 q_k) * L^2}{8}$$

$$= \frac{(1,0 * 1,6 \text{ kN/m} + 0,3 * 2,0 \text{ kN/m}) * (5,4 \text{ m})^2}{8} = 8,019 \text{ kNm}$$

$$= 8,019 * 10^6 \text{ Nmm}$$

Taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\sigma_{m,d} = M_d \left(d_{max} + \frac{h}{2} \right) \frac{E_1}{EI_0}$$

$$= 8,019 * 10^6 \text{ Nmm} * 72 \text{ mm} * \frac{11069 \text{ N/mm}^2}{1,553 * 10^{12} \text{ Nmm}^2}$$

$$= 4,115 \text{ N/mm}^2$$

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo palotilanteessa

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{m,k} k_{fi} k_{sys} = \frac{1,0}{1,0} * 24,0 \text{ N/mm}^2 * 1,15 * 1,2 = 33,12 \text{ N/mm}^2$$

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} = 4,115 \text{ N/mm}^2 \leq 33,12 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 12,4 \%}$$

3.2 Tasoa vastaan kohtisuora leikkauskestävyys**Staattiset momentit**

$$S_R = \sum_{i=1}^{n_L} B h_i d_i = 1000 \text{ mm} * 40 \text{ mm} * 41 \text{ mm} = 1640000 \text{ mm}^3$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n_L} B h_i d_i + \frac{B h_n d_n}{2} = 2400000 \text{ mm}^3 + \frac{1000 \text{ mm} * 1 \text{ mm} * 0,5 \text{ mm}}{2}$$

$$= 1640250 \text{ mm}^3$$

Pitkittäiskerrostien neliömomentti

$$I_0 = 2 \left(\frac{1000 \text{ mm} * (40 \text{ mm})^3}{12} \right) + \frac{1000 \text{ mm} * (13 \text{ mm})^3}{12}$$

$$+ 40000 \text{ mm}^2 * (41 \text{ mm})^2 + 40000 \text{ mm}^2 * (19 \text{ mm})^2$$

$$+ 13000 \text{ mm}^2 * (13 \text{ mm})^2 = 94726750 \text{ mm}^4$$

Leikkausvoiman mitoitusarvo palotilanteessa

$$V_d = \frac{(1,0 g_k + \psi_2 q_k) L}{2}$$

$$= \frac{(1,0 * 1,6 \text{ kN/m} + 0,3 * 2,0 \text{ kN/m}) * 5,4 \text{ m}}{2} = 5,940 \text{ kN}$$

Vierintäleikkausjännityksen mitoitusarvo poikittaikerroksessa

$$\tau_{v,R,d} = \frac{V_d S_R}{I_0 B} = \frac{5940 \text{ N} * 1640000 \text{ mm}^3}{94726750 \text{ mm}^4 * 1000 \text{ mm}} = 0,103 \text{ N/mm}^2$$

Vierintäleikkauslujuuden mitoitusarvo palotilanteessa

$$f_{v,R,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{v,R,k} k_{fi} = \frac{1,0}{1,0} * 1,1 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 1,265 \text{ N/mm}^2$$

Vierintäleikkauskestävyyden mitoitussehto

$$\tau_{v,R,d} \leq f_{v,R,d} = 0,103 \text{ N/mm}^2 \leq 1,265 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 8,1 \%}$$

Leikkausjännityksen mitoitusarvo pitkittäikerroksessa

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d S_0}{I_0 B} = \frac{5940 \text{ N} * 1640250 \text{ mm}^3}{94726750 \text{ mm}^4 * 1000 \text{ mm}} = 0,103 \text{ N/mm}^2$$

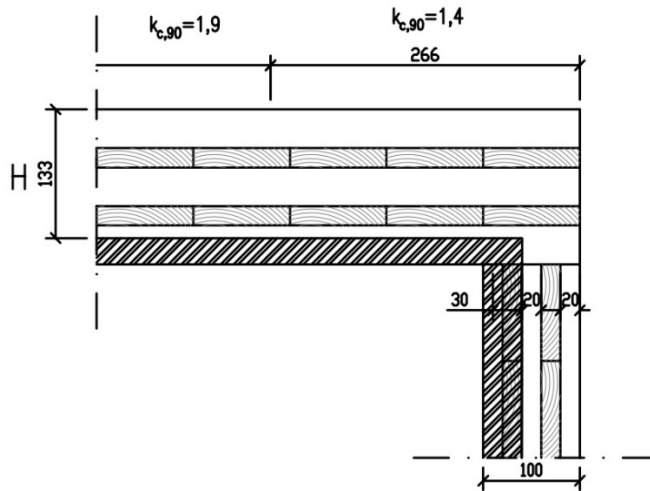
Pitkittäikerroksen leikkauslujuuden mitoitusarvo palotilanteessa

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{v,0,k} k_{fi} = \frac{1,0}{1,0} * 2,5 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 2,875 \text{ N/mm}^2$$

Pitkittäikerroksen leikkauslujuuden mitoitussehto

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} = 0,103 \text{ N/mm}^2 \leq 2,875 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 3,6 \%}$$

3.3 Puristuskestävyys kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan



Kuva L3.5 Tehollinen pinta-ala ja kerroin $k_{c,90}$ hiiltymisen jälkeen.

Suurin puristusjännitys sijaitsee reuna-alueella

$$\Rightarrow k_{c,90} = 1,4$$

Tehollisessa pinta-alassa tulee huomioida seinän hiiltyminen. Tällöin voidaan huomioida vain seinän kaksi jäljelle jäävää pystylamellikerrosta. Lisäksi huomioidaan tehollisen pinta-alan kasvattaminen 30 mm:llä

$$\Rightarrow A_{eff} = (20 \text{ mm} + 20 \text{ mm} + 30 \text{ mm}) * 1000 \text{ mm} = 70000 \text{ mm}^2$$

Puristusvoima tuella yhtä suuri kuin aiemmin laskettu leikkausvoiman mitoitusarvo

$$\Rightarrow N_{90,d} = V_d = 5,940 \text{ kN}$$

Puristusjännityksen mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{90,d}}{k_{c,90} A_{eff}} = \frac{5940 \text{ N}}{1,4 * 70000 \text{ mm}^2} = 0,06 \text{ N/mm}^2$$

Rakenteen puristuslujuuden mitoitusarvo kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan palotilanteessa

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{c,90,k} k_{fi} = \frac{1,0}{1,0} * 3,0 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 3,45 \text{ N/mm}^2$$

Kohtisuoraan pitkittäiskerroksia vastaan esiintyvän puristuksen mitoitusehto

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d} = 0,060 \text{ N/mm}^2 \leq 3,45 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste } 1,7 \%$$

DOF-LÄMPÖ 3.0	
Rakennuskohde:	Diplomityö
Suunnittelija:	Arto Koski
Yritys:	Insinööri- ja arkkitehtitoimisto Oy Palola & Piispanen
Rakenneosan nimi/tunnus:	Yläpohja
Rakennusluokka:	9 Muut rakennukset, lämmin tila
Lisätiedot:	
Lisätietoja	
Suunnittelija:	Paivays:
Arto Koski	30.5.2021
www.laskentapalvelut.fi - DOF-LÄMPÖ 3.0 - 1.12.2017	

Kuva L3.6 Yläpohjan U-arvon laskelmat.

PERUSTIEDOT	
Rakenne:	Katto (ilman aluskatetta)
Kattokulma:	0
Rakenneosan kok. pinta-ala (m ²):	1.00
Ulkopinnan pintavastus (m ² K/W):	0.04
Sisäpinnan pintavastus (m ² K/W):	0.10
Korjaustermi deltaU (W/m ² K):	0.01
Korjaustermien selite:	Ilmaraon korjaustermi
Kylmäsiltojen päällekkäisyys:	Mahdollisimman kohdakkain
U-arvon laskentatulokset	
Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo:	12.103 m ² K/W
Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alakiiarvo:	12.103 m ² K/W
Rakennusosan kokonaislämmönvastus:	12.103 m ² K/W
U-arvo (ilman korjaustermiä)	0.083 W/m ² K
Laskettu/annettu korjaustermi:	0.010 W/m ² K
U-arvo (korjaustermi huomioiden):	0.093 W/m ² K
U-arvo (pyöristetty arvo):	0.09 W/m ² K
Uudiskohteen vertailuarvo:	0.09 W/m ² K
www.laskentapalvelut.fi - DOF-LÄMPÖ 3.0 - 1.12.2017	

Kuva L3.7 Yläpohjan U-arvon laskelmat.

TARKASTELUHETKET/-JAKSOT					
Tarkastelujakson nimi:	T _{ulko} (C):	T _{sisä} (C):	RH _{ulko} (%):	RH _{sisä} (%):	Kesto (h):
Vyöhyke 1, Mitoitustilanne	-26.00	21	90	50.0	24.0
Vyöhyke 1, Tammikuu	-3.97	21	85	50.0	744
Vyöhyke 1, Helmikuu	-4.50	21	84	50.0	672
Vyöhyke 1, Maaliskuu	-2.58	21	82	50.0	744
Vyöhyke 1, Huhtikuu	4.50	21	75	50.0	720
Vyöhyke 1, Toukokuu	10.76	21	67	50.0	744
Vyöhyke 1, Kesäkuu	14.23	21	68	50.0	720
Vyöhyke 1, Heinäkuu	17.30	21	73	50.0	744
Vyöhyke 1, Elokuu	16.05	21	78	50.0	744
Vyöhyke 1, Syyskuu	10.53	21	82	50.0	720
Vyöhyke 1, Lokakuu	6.20	21	83	50.0	744
Vyöhyke 1, Marraskuu	0.5	21	86	50.0	720
Vyöhyke 1, Joulukuu	-2.19	21	86	50.0	744

Tarkastelujaksojen 2-13 lämpöhäviöt (1.00 m² kohden)	
Tarkastelujakson nimi:	Lämpöhäviö:
Vyöhyke 1, Tammikuu	1.672 kWh
Vyöhyke 1, Helmikuu	1.542 kWh
Vyöhyke 1, Maaliskuu	1.579 kWh
Vyöhyke 1, Huhtikuu	1.069 kWh
Vyöhyke 1, Toukokuu	0.686 kWh
Vyöhyke 1, Kesäkuu	0.439 kWh
Vyöhyke 1, Heinäkuu	0.248 kWh
Vyöhyke 1, Elokuu	0.331 kWh
Vyöhyke 1, Syyskuu	0.678 kWh
Vyöhyke 1, Lokakuu	0.991 kWh
Vyöhyke 1, Marraskuu	1.328 kWh
Vyöhyke 1, Joulukuu	1.553 kWh
Lämpöhäviö ulos yhteensä:	12.117 kWh

www.laskentapalvelut.fi - DOF-LÄMPÖ 3.0 - 1.12.2017

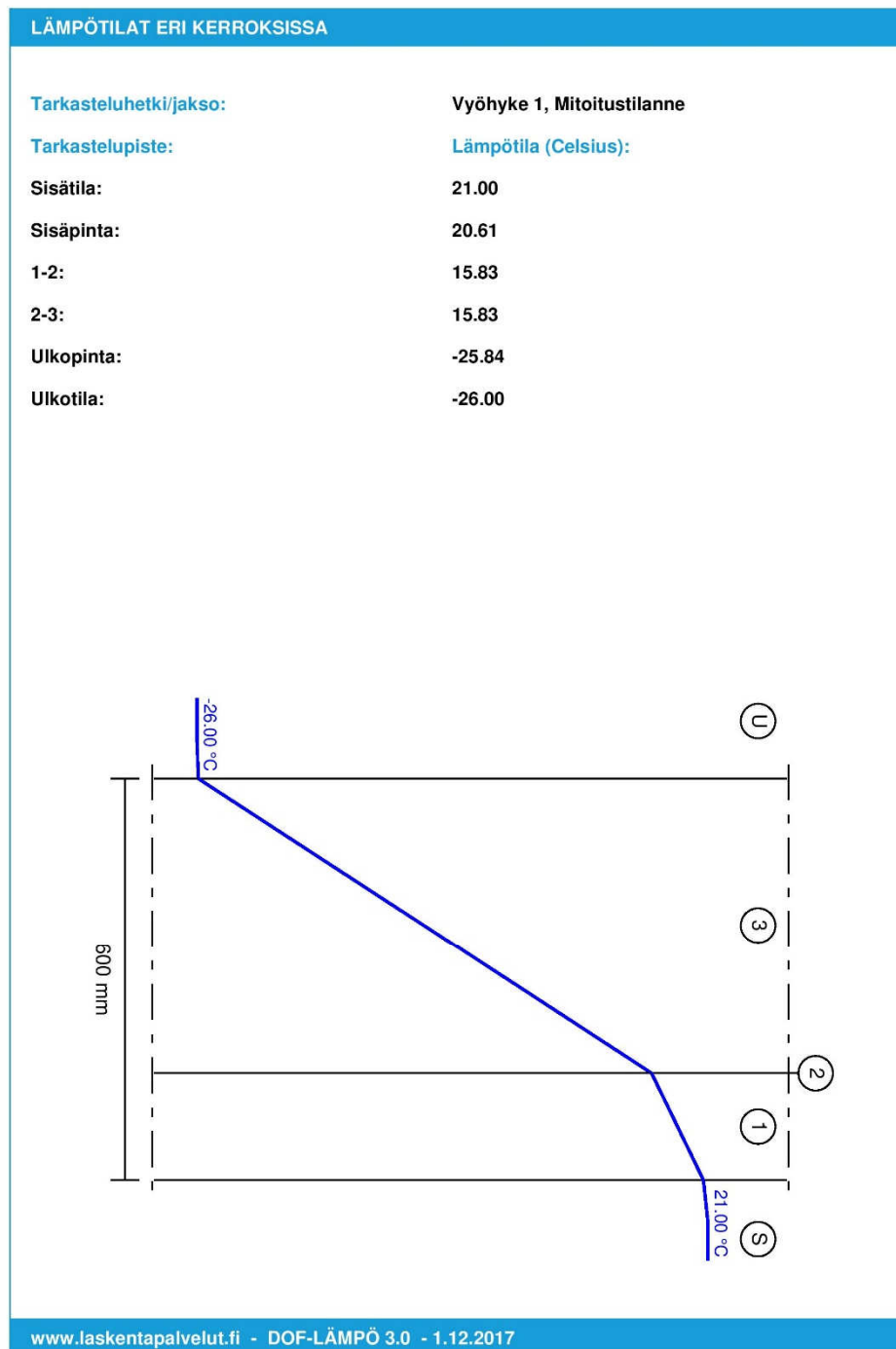
Kuva L3.8 Yläpohjan U-arvon laskelmat.

RAKENNEKERROKSET				
Kerros:	Paksuus:	Materiaali:	Lambda:	VHL:
	(mm)		(W/mK)	(kg/msPa)
1	160.00	CLT	0.130	4.000e-12
2	0.30	Ilmansulkupaperi	0.330	9.700e-14
3	440.00	Puhallusvilla	0.041	1.05e-10

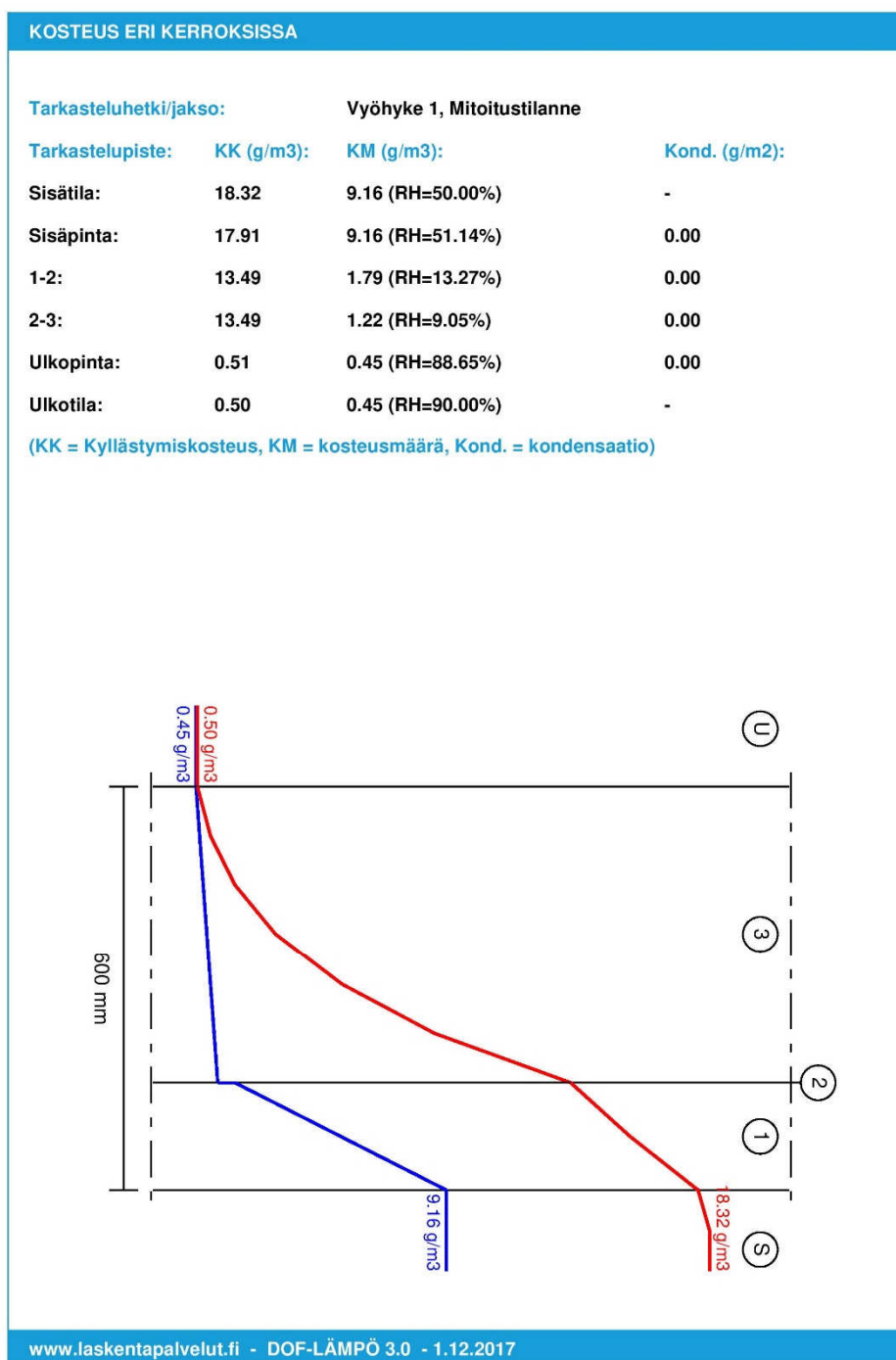
600 mm

1
2
3

Kuva L3.9 Yläpohjan U-arvon laskelmat.



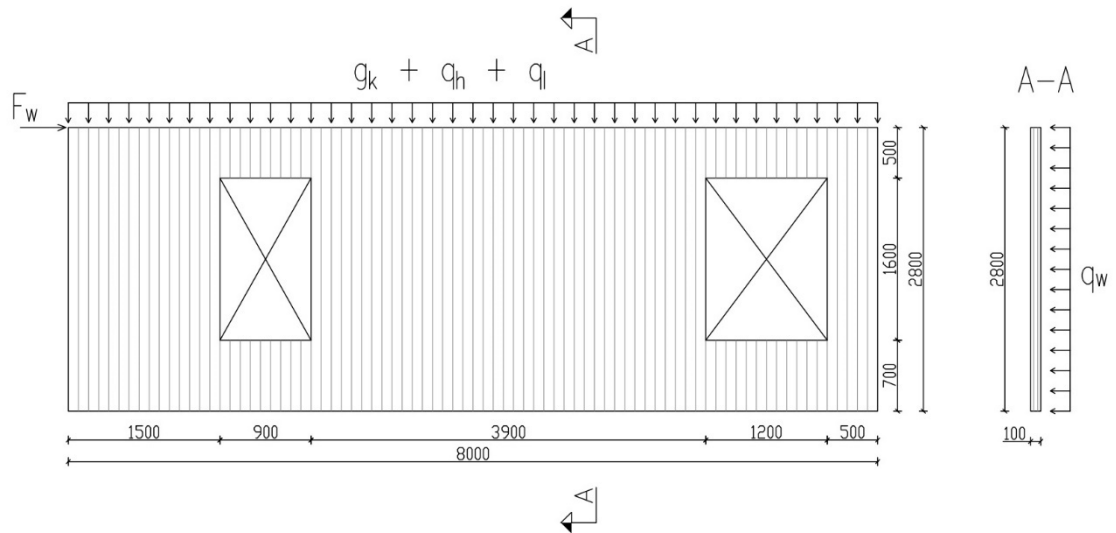
Kuva L3.10 Yläpohjan U-arvon laskelmat.



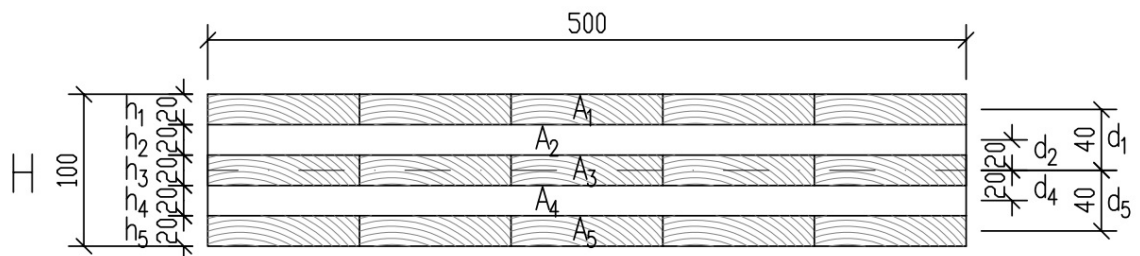
Kuva L3.11 Yläpohjan U-arvon laskelmat.

Kannatettavan välipohjan sekä yläpohjan jänneväli sama kuin aiemmissa mitoituksissa, $L=5,4$ metriä. Mitoitus suoritetaan $0,5$ metrin levyiselle kaistalle ikkuna-aukosta johtuen, jolloin kuormitusleveys on $0,5 \text{ m} + 1,2 \text{ m} / 2 = 1,1 \text{ m}$. Materiaaliarvoina käytetään taulukon 1 mukaisia arvoja.

Tuulikuormien tarkempaa määrittystä ei käydy läpi. Seinään kohdistuu kohtisuora tuulikuorma q_w sekä rakennuksen kokonaisjäykistyslaskennan mukainen voima F_w .



Kuva L4.1 Tarkasteltava ulkoseinärakenne.



Kuva L4.2 Mitoitettava CLT-poikkileikkaus.

Pysyvät kuormat

$$\text{Väli pohjan omapaino} = 2,5 \text{ kN/m}^2 * 5,4 \text{ m} / 2 * 1,1 \text{ m} = 7,425 \text{ kN}$$

$$\text{Yläpohjan omapaino} = 1,6 \text{ kN/m}^2 * 5,4 \text{ m} / 2 * 1,1 \text{ m} = 4,752 \text{ kN}$$

Yläpuolisen seinän omapaino = $1,4 \text{ kN/m} * 1,1 \text{ m} = 1,540 \text{ kN}$

Seinän omapaino $g_k = 1,4 \text{ kN/m} * 0,5 \text{ m} = 0,700 \text{ kN}$

Muuttuvat kuormat

Välipohjan hyötykuorma $q_h = 2,5 \text{ kN/m}^2 * 5,4 \text{ m} / 2 * 1,1 \text{ m} = 7,425 \text{ kN}$

Välipohjan hyötykuorma $q_l = 2,0 \text{ kN/m}^2 * 5,4 \text{ m} / 2 * 1,1 \text{ m} = 5,940 \text{ kN}$

Tuulikuorma $q_w = 0,67 \text{ kN/m}^2 * 1,1 \text{ m} = 0,737 \text{ kN/m}$

Rakennuksen jäykistyksestä koituva vaakakuorma $F_w = 21 \text{ kN}$

1. Murtorajatila**1.1 Puristuskestävyys pitkittäiskerrostien suunnassa**

Puristava voima murtorajatilassa, mitoittavin kuormitusyhdistelmä

$$\begin{aligned} N_{0,d} &= 1,15 g_k + 1,5 q_h + 1,5 \psi_0 q_l \\ &= 1,15 * (7,425 + 4,752 + 1,540 + 0,700) \text{ kN} + 1,5 * 7,425 \text{ kN} \\ &\quad + 1,5 * 0,7 * 5,940 \text{ kN} = 33,954 \text{ kN} \end{aligned}$$

Puristusjännitys pitkittäiskerroksissa

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{0,d}}{B h_0} = \frac{33954 \text{ N}}{1000 \text{ mm} * 60 \text{ mm}} = 0,566 \text{ N/mm}^2$$

Puristuskestävyys pitkittäissuunnassa

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{c,0,k} = \frac{0,8}{1,25} * 21,0 \text{ N/mm}^2 = 13,44 \text{ N/mm}^2$$

Puristuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} = 0,566 \text{ N/mm}^2 \leq 13,44 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste } 4,2 \%$$

1.2 Nurjahdus Gamma-menetelmän mukaan

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_1 = A_2 = A_3 = 20 \text{ mm} * 500 \text{ mm} = 10000 \text{ mm}^2$$

Etäisyys lamellikerrosten keskipisteestä poikkileikkauksen keskipisteeseen

$$d_1 = d_5 = 40 \text{ mm}$$

Rakenne mitoitetaan koko seinän korkuisena pilarina, joka on nivelellisesti tuettu molemmista päistään, jolloin nurjahduspituus $L_E = 2800 \text{ mm}$

Liitoksen hyötysuhdekerroin γ_1

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 E_1 A_1}{L_E^2} \frac{h_2}{G_R B} \right)}$$

$$= \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 * 11550 \text{ N/mm}^2 * 10000 \text{ mm}^2}{(2800 \text{ mm})^2} \frac{20 \text{ mm}}{65 \text{ N/mm}^2 * 500 \text{ mm}} \right)} = 0,918$$

Tehollinen neliömomentti

$$I_{eff,0} = \sum_{i=1}^n (I_i + \gamma_i A_i d_i^2)$$

$$I_{eff,0} = 3 \left(\frac{500 \text{ mm} * (20 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2 (0,918 * 10000 \text{ mm}^2 * (40 \text{ mm})^2)$$

$$= 30376000 \text{ mm}^4$$

Tuulikuormasta aiheutuvan momentin mitoitusarvo

$$M_d = \frac{(1,5 * q_w) * L_E^2}{8} = \frac{1,5 * 0,737 \text{ kN/m} * (2,8 \text{ m})^2}{8} = 1,084 \text{ kNm}$$

$$= 1,084 * 10^6 \text{ Nmm}$$

Tuulikuormasta aiheutuvan taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{I_{eff,0}} (\gamma_1 d_1 + 0,5 h_1)$$

$$= \frac{1,084 * 10^6 \text{ Nmm}}{30376000 \text{ mm}^4} (0,918 * 40 \text{ mm} + 0,5 * 20 \text{ mm}) = 1,667 \text{ N/mm}^2$$

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{m,k} k_{sys} = \frac{0,8}{1,25} * 24,0 \text{ N/mm}^2 * 1,114 = 17,111 \text{ N/mm}^2$$

Taivutusta vastaava suhteellinen hoikkuus mitoitettavassa suunnassa

$$\lambda = L_E \sqrt{\frac{A_{eff}}{I_{eff,0}}} = 2800 \text{ mm} \sqrt{\frac{3 * 10000 \text{ mm}^2}{30376000 \text{ mm}^4}} = 87,99$$

Suhteellisen hoikkuuden raja-arvo

$$\lambda \leq 150 = 87,99 \leq 150 \Rightarrow \text{OK}$$

Poikkileikkauksen suhteellinen hoikkuus mitoitettavassa suunnassa

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{87,99}{\pi} \sqrt{\frac{21 \text{ N/mm}^2}{9625 \text{ N/mm}^2}} = 1,308$$

Epälineaarisuuteen liittyvä apusuure

$$k = 0,5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) \\ = 0,5 (1 + 0,1 * (1,308 - 0,3) + 1,308^2) = 1,406$$

Nurjahdukseen liittyvä epälineaarisuuskerroin

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \leq 1 = \frac{1}{1,406 + \sqrt{1,406^2 - 1,308^2}} = 0,520 \leq 1$$

Nurjahduksen mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 = \frac{0,566 \text{ N/mm}^2}{0,520 * 13,44 \text{ N/mm}^2} + \frac{1,667 \text{ N/mm}^2}{17,111 \text{ N/mm}^2} \\ = 0,081 + 0,097 = 0,178 \leq 1 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 17,8 \%}$$

1.3 Nurjahdus leikkausanalogian mukaan**Poikkileikkauksen neliömomentti, vain pitkittäiskerrokset huomioidaan**

$$I_0 = \sum_{i=1}^n (I_i + A_i d_i^2) \\ I_0 = 3 \left(\frac{500 \text{ mm} * (20 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2 (10000 \text{ mm}^2 * (40 \text{ mm})^2) \\ = 33000000 \text{ mm}^4$$

Tuulikuormasta aiheutuvan taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{I_0} (d_1 + 0,5 h_1) \\ = \frac{1,084 * 10^6 \text{ Nmm}}{33000000 \text{ mm}^4} (40 \text{ mm} + 0,5 * 20 \text{ mm}) = 1,642 \text{ N/mm}^2$$

Tehollinen leikkausjäykkyys

$$GA_{eff} = \frac{h_s^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2 G_1 b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2 G_n b} \right) \right]}$$

$$= \frac{(80 \text{ mm})^2}{\left(2 \left(\frac{20 \text{ mm}}{2 * 690 \text{ N/mm}^2 * 500 \text{ mm}} \right) + \left(\frac{20 \text{ mm}}{690 \text{ N/mm}^2 * 500 \text{ mm}} \right) + \left(\frac{20 \text{ mm}}{65 \text{ N/mm}^2 * 500 \text{ mm}} \right) \right)}$$

$$= 8751220 \text{ N}$$

Eulerin nurjahdusvoima

$$N_E = \frac{\pi^2 E_{0,05} I_0}{L_E^2} = \frac{\pi^2 * 9625 \text{ N/mm}^2 * 33000000 \text{ mm}^4}{(2800 \text{ mm})^2} = 399851 \text{ N}$$

Leikkausmuodonmuutokset huomioiva Eulerin nurjahdusvoima

$$N_{E,v} = \frac{N_E}{1 + \frac{\kappa N_E}{GA_{eff}}} = \frac{399851 \text{ N}}{1 + \frac{1,0 * 399851 \text{ N}}{8751220 \text{ N}}} = 382380 \text{ N}$$

Nurjahduksen mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \left[\frac{1}{1 - \frac{N_{0,d}}{N_{E,v}}} \right] \leq 1$$

$$= \frac{0,566 \text{ N/mm}^2}{13,44 \text{ N/mm}^2} + \frac{1,667 \text{ N/mm}^2}{17,111 \text{ N/mm}^2} \left[\frac{1}{1 - \frac{33954 \text{ N}}{382380 \text{ N}}} \right] \leq 1$$

$$= 0,042 + 0,107 = 0,149 \leq 1 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 14,9 \%}$$

1.4 Tason suuntainen leikkauskestävyys

Seinään kohdistuvan tason suuntaisen leikkausvoiman jakautumista seinässä ei tarkkaan tunneta ikkuna-aukkojen takia. Mitoitetaan tason suuntainen leikkauskestävyys leveimmän ehjän osan mukaan, eli leveydelle 3900 mm. Levyyn kohdistuva leikkausvoima $V_d = F_w = 21 \text{ kN}$. Oletetaan kaikkien lamellien leveydeksi $a = 100 \text{ mm}$. Hetkellinen aikaluokka $\Rightarrow k_{mod} = 1,1$

1.4.1 Paneelileikkauskestävyys**Koko levyyn kohdistuva syysuuntainen leikkausjännitys**

$$\tau_{v,d} = \frac{V_d}{A} = \frac{21000 \text{ N}}{3900 \text{ mm} * 100 \text{ mm}} = 0,054 \text{ N/mm}^2$$

Leikkauslujuuden mitoitusarvo

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,0,k} = \frac{1,1}{1,25} * 2,5 \text{ N/mm}^2 = 2,2 \text{ N/mm}^2$$

Leikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} = 0,054 \text{ N/mm}^2 \leq 2,2 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 2,5 \%}$$

1.4.2 Lamellileikkauskestävyys**Syysuuntaa vastaan kohtisuora leikkausjännitys**

$$\tau_{v,S,d} = \frac{V_d}{A_{net}} = \frac{21000 \text{ N}}{3900 \text{ mm} * 40 \text{ mm}} = 0,135 \text{ N/mm}^2$$

Lamellileikkauslujuuden mitoitusarvo

$$f_{v,S,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,90,k} = \frac{1,1}{1,25} * 5,0 \text{ N/mm}^2 = 4,4 \text{ N/mm}^2$$

Lamellileikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} = 0,135 \text{ N/mm}^2 \leq 4,4 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 3,1 \%}$$

1.4.2 Lamellien kosketuspinnan vääntöleikkauskestävyys**Kosketuspintojen lukumäärä, yhden lamellin leveys 100 mm**

$$n = \left(\frac{3900 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} * \frac{2800 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} \right) * 3 = 3276 \text{ kpl}$$

Lamellien kosketuspinnan vääntöleikkausjännitys

$$\tau_{T,d} = \frac{3 V_d H}{n a^3} = \frac{3 * 21000 \text{ N} * 2800 \text{ mm}}{3276 * (100 \text{ mm})^3} = 0,054 \text{ N/mm}^2$$

Rakenteen vääntöleikkauskestävyys

$$f_{v,T,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{v,T,k} = \frac{1,1}{1,25} * 2,5 \text{ N/mm}^2 = 2,2 \text{ N/mm}^2$$

Vääntöleikkauskestävyyden mitoitusehto

$$\tau_{T,d} \leq f_{v,T,d} = 0,054 \text{ N/mm}^2 \leq 2,2 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 2,5 \%}$$

2. Palomitoitus

Ulkoseinärakenteelta vaadittava palonkesto-aika on 30 minuuttia. Hiiltymisnopeuden perusnopeutena käytetään 0,65 mm/min.

Hiiltymissyvyys

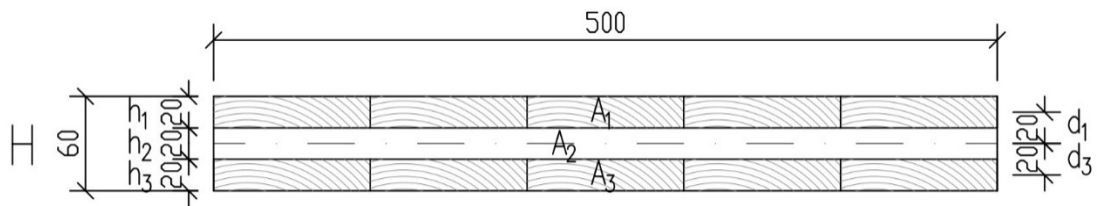
$$d_{char} = \beta_0 t = 0,65 \text{ mm/min} * 30 \text{ min} = 19,5 \text{ mm}$$

Teoreettinen lujuuden ja jäykkyyden menettänyt kerros

$$\begin{aligned} d_{eff} &= d_{char,0} + k_0 d_0 = 19,5 \text{ mm} + 1,0 * 7 \text{ mm} \\ &= 26,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Teoreettinen lujuuden ja jäykkyyden menettänyt kerros ylettyy poikittaiskerrokseen, joka täytyy jättää huomioimatta laskennassa.

Jäljelle jäävä poikkileikkaus



Kuva L4.3 Hiiltymisen jälkeen jäljelle jäävä poikkileikkaus.

2.1 Puristuskestävyys pitkittäiskerrostien suunnassa

Puristava voima palotilanteessa, mitoittavin kuormitusyhdistelmä

$$\begin{aligned} N_{0,d} &= 1,0 g_k + 1,0 \psi_2 q_{h1} + 1,0 \psi_2 q_{l1} \\ &= 1,0 * (7,425 + 4,752 + 1,540 + 0,700) \text{ kN} + 1,0 * 0,3 * 7,425 \text{ kN} \\ &\quad + 1,0 * 0,2 * 5,940 \text{ kN} = 17,833 \text{ kN} \end{aligned}$$

Puristusjännitys pitkittäiskerroksissa

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{0,d}}{B h_0} = \frac{17833 \text{ N}}{500 \text{ mm} * 40 \text{ mm}} = 0,892 \text{ N/mm}^2$$

Puristuskestävyys pitkittäissuunnassa palotilanteessa

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{c,0,k} k_{fi} = \frac{1,0}{1,0} * 21,0 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 24,15 \text{ N/mm}^2$$

Puristuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} = 0,892 \text{ N/mm}^2 \leq 24,15 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 3,7 \%}$$

2.2 Nurjahdus Gamma-menetelmän mukaan

Lamellikerrosten poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_1 = A_2 = A_3 = 20 \text{ mm} * 500 \text{ mm} = 10000 \text{ mm}^2$$

Etäisyys lamellikerrosten keskipisteestä poikkileikkauksen keskipisteeseen

$$d_1 = d_3 = 20 \text{ mm}$$

Rakenne mitoitetaan koko seinän korkuisena pilarina, joka on nivelellisesti tuettu molemmista päistään, jolloin nurjahduspituus $L_E = 2800 \text{ mm}$

Palotilanteen kimmomoduuli ja vierintäliukumoduuli

$$E_0 = 9625 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 11069 \text{ N/mm}^2$$

$$G_R = 54 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 62,1 \text{ N/mm}^2$$

Liitoksen hyötysuhdekerroin γ_1

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 E_1 A_1}{L_E^2} \frac{h_2}{2 G_R B} \right)} \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^2 * 11069 \text{ N/mm}^2 * 10000 \text{ mm}^2}{(2800 \text{ mm})^2} \frac{20 \text{ mm}}{2 * 62,1 \text{ N/mm}^2 * 500 \text{ mm}} \right)} = 0,957 \end{aligned}$$

Tehollinen neliömomentti

$$\begin{aligned} I_{eff,0} &= \sum_{i=1}^n (I_i + \gamma_i A_i d_i^2) \\ I_{eff,0} &= 2 \left(\frac{500 \text{ mm} * (20 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2 (0,957 * 10000 \text{ mm}^2 * (20 \text{ mm})^2) \\ &= 8322666,7 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Tuulikuormasta aiheutuvan momentin mitoitusarvo

$$M_d = \frac{(1,0 * \psi_1 * q_w) * L_E^2}{8} = \frac{1,0 * 0,2 * 0,737 \text{ kN/m} * (2,8 \text{ m})^2}{8} = 0,1445 \text{ kNm}$$

$$= 0,1445 * 10^6 \text{ Nmm}$$

Tuulikuormasta aiheutuvan taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{I_{eff,0}} (\gamma_1 d_1 + 0,5 h_1)$$

$$= \frac{0,1445 * 10^6 \text{ Nmm}}{8322666,7 \text{ mm}^4} (0,957 * 20 \text{ mm} + 0,5 * 20 \text{ mm}) = 0,506 \text{ N/mm}^2$$

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo palotilanteessa

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} f_{m,k} k_{fi} k_{sys} = \frac{1,0}{1,0} * 24,0 \text{ N/mm}^2 * 1,15 * 1,114 = 30,746 \text{ N/mm}^2$$

Taivutusta vastaava suhteellinen hoikkuus mitoitettavassa suunnassa

$$\lambda = L_E \sqrt{\frac{A_{eff}}{I_{eff,0}}} = 2800 \text{ mm} \sqrt{\frac{2 * 10000 \text{ mm}^2}{8322666,7 \text{ mm}^4}} = 137,26$$

Suhteellisen hoikkuuden raja-arvo

$$\lambda \leq 200 = 137,26 \leq 200 \Rightarrow \text{OK}$$

Poikkileikkauksen suhteellinen hoikkuus mitoitettavassa suunnassa

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{137,26}{\pi} \sqrt{\frac{21 \text{ N/mm}^2}{9625 \text{ N/mm}^2}} = 2,041$$

Epälineaarisuuteen liittyvä apusuure

$$k = 0,5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2)$$

$$= 0,5 (1 + 0,1 * (2,041 - 0,3) + 2,041^2) = 2,670$$

Nurjahdukseen liittyvä epälineaarisuuskerroin

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \leq 1 = \frac{1}{2,670 + \sqrt{2,670^2 - 2,041^2}} = 0,228 \leq 1$$

Nurjahduksen mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 = \frac{0,892 \text{ N/mm}^2}{0,228 * 24,15 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,506 \text{ N/mm}^2}{30,746 \text{ N/mm}^2}$$

$$= 0,162 + 0,016 = 0,178 \leq 1 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 17,8 \%}$$

2.3 Nurjahdus leikkausanalogian mukaan**Poikkileikkauksen neliömomentti, vain pitkittäiskerrokset huomioidaan**

$$I_0 = \sum_{i=1}^n (I_i + A_i d_i^2)$$

$$I_0 = 2 \left(\frac{500 \text{ mm} * (20 \text{ mm})^3}{12} \right) + 2(10000 \text{ mm}^2 * (20 \text{ mm})^2)$$

$$= 8666666,7 \text{ mm}^4$$

Tuulikuormasta aiheutuvan taivutusjännityksen mitoitusarvo

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{I_0} (d_1 + 0,5 h_1)$$

$$= \frac{0,1445 * 10^6 \text{ Nmm}}{8666666,7 \text{ mm}^4} (20 \text{ mm} + 0,5 * 20 \text{ mm}) = 0,500 \text{ N/mm}^2$$

Palotilanteen liukumoduuli pitkittäissuunnassa

$$G_0 = 690 \text{ N/mm}^2 * 1,15 = 793,5 \text{ N/mm}^2$$

Tehollinen leikkausjäykkyys

$$GA_{eff} = \frac{h_s^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2 G_1 b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2 G_n b} \right) \right]}$$

$$= \frac{(40 \text{ mm})^2}{\left(2 \left(\frac{20 \text{ mm}}{2 * 793,5 \text{ N/mm}^2 * 500 \text{ mm}} \right) + \left(\frac{20 \text{ mm}}{62,1 \text{ N/mm}^2 * 500 \text{ mm}} \right) \right)} = 2303710 \text{ N}$$

Eulerin nurjahdusvoima

$$N_E = \frac{\pi^2 E_{0,05} k_{fi} I_0}{L_E^2} = \frac{\pi^2 * 9625 \text{ N/mm}^2 * 1,15 * 8666666,7 \text{ mm}^4}{(2800 \text{ mm})^2} = 120763 \text{ N}$$

Leikkausmuodonmuutokset huomioiva Eulerin nurjahdusvoima

$$N_{E,v} = \frac{N_E}{1 + \frac{\kappa N_E}{GA_{eff}}} = \frac{120763 \text{ N}}{1 + \frac{1,0 * 120763 \text{ N}}{2303710 \text{ N}}} = 114748 \text{ N}$$

Nurjahduksen mitoitusehto

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \left[\frac{1}{1 - \frac{N_{0,d}}{N_{E,v}}} \right] &\leq 1 \\ &= \frac{0,892 \text{ N/mm}^2}{24,15 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,506 \text{ N/mm}^2}{30,746 \text{ N/mm}^2} \left[\frac{1}{1 - \frac{17833 \text{ N}}{114748 \text{ N}}} \right] \leq 1 \\ &= 0,037 + 0,017 = 0,054 \leq 1 \Rightarrow \text{OK. Käyttöaste 5,4 \%} \end{aligned}$$

DOF-LÄMPÖ 3.0	
Rakennuskohde:	Diplomityö
Suunnittelija:	Arto Koski
Yritys:	Insinööri- ja arkkitehtitoimisto Oy Palola & Piispanen
Rakenneosan nimi/tunnus:	Ulkoseinä
Rakennusluokka:	9 Muut rakennukset, lämmin tila
Lisätiedot:	
Suunnittelija: Arto Koski	Paivays: 30.5.2021
www.laskentapalvelut.fi - DOF-LÄMPÖ 3.0 - 1.12.2017	

Kuva L4.4 Ulkoseinän U-arvon laskelmat.

PERUSTIEDOT	
Rakenne:	Seinä (tuulettetulla ilmaraolla)
Rakenneosan kok. pinta-ala (m ²):	1.00
Ulkopinnan pintavastus (m ² K/W):	0.13
Sisäpinnan pintavastus (m ² K/W):	0.13
Korjaustermi deltaU (W/m ² K):	0.0100
Korjaustermi selite:	Ilmaraon korjaustermi
Kylmäsiltojen päällekkäisyys:	Mahdollisimman kohdakkain
U-arvon laskentatulokset	
Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvo:	6.485 m ² K/W
Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo:	6.485 m ² K/W
Rakennusosan kokonaislämmönvastus:	6.485 m ² K/W
U-arvo (ilman korjaustermiä)	0.154 W/m ² K
Laskettu/annettu korjaustermi:	0.010 W/m ² K
U-arvo (korjaustermi huomioiden):	0.164 W/m ² K
U-arvo (pyöristetty arvo):	0.16 W/m ² K
Uudiskohteen vertailuarvo:	0.17 W/m ² K
www.laskentapalvelut.fi - DOF-LÄMPÖ 3.0 - 1.12.2017	

Kuva L4.5 Ulkoseinän U-arvon laskelmat.

TARKASTELUHETKET/-JAKSOT					
Tarkastelujakson nimi:	T _{ulko} (C):	T _{sisä} (C):	RH _{ulko} (%):	RH _{sisä} (%):	Kesto (h):
Vyöhyke 1, Mitoitustilanne	-26.00	21	90	50.0	24.0
Vyöhyke 1, Tammikuu	-3.97	21	85	50.0	744
Vyöhyke 1, Helmikuu	-4.50	21	84	50.0	672
Vyöhyke 1, Maaliskuu	-2.58	21	82	50.0	744
Vyöhyke 1, Huhtikuu	4.50	21	75	50.0	720
Vyöhyke 1, Toukokuu	10.76	21	67	50.0	744
Vyöhyke 1, Kesäkuu	14.23	21	68	50.0	720
Vyöhyke 1, Heinäkuu	17.30	21	73	50.0	744
Vyöhyke 1, Elokuu	16.05	21	78	50.0	744
Vyöhyke 1, Syyskuu	10.53	21	82	50.0	720
Vyöhyke 1, Lokakuu	6.20	21	83	50.0	744
Vyöhyke 1, Marraskuu	0.5	21	86	50.0	720
Vyöhyke 1, Joulukuu	-2.19	21	86	50.0	744

Tarkastelujaksojen 2-13 lämpöhäviöt (1.00 m² kohden)	
Tarkastelujakson nimi:	Lämpöhäviö:
Vyöhyke 1, Tammikuu	2.972 kWh
Vyöhyke 1, Helmikuu	2.742 kWh
Vyöhyke 1, Maaliskuu	2.807 kWh
Vyöhyke 1, Huhtikuu	1.901 kWh
Vyöhyke 1, Toukokuu	1.219 kWh
Vyöhyke 1, Kesäkuu	0.780 kWh
Vyöhyke 1, Heinäkuu	0.440 kWh
Vyöhyke 1, Elokuu	0.589 kWh
Vyöhyke 1, Syyskuu	1.206 kWh
Vyöhyke 1, Lokakuu	1.762 kWh
Vyöhyke 1, Marraskuu	2.362 kWh
Vyöhyke 1, Joulukuu	2.761 kWh
Lämpöhäviö ulos yhteensä:	21.541 kWh

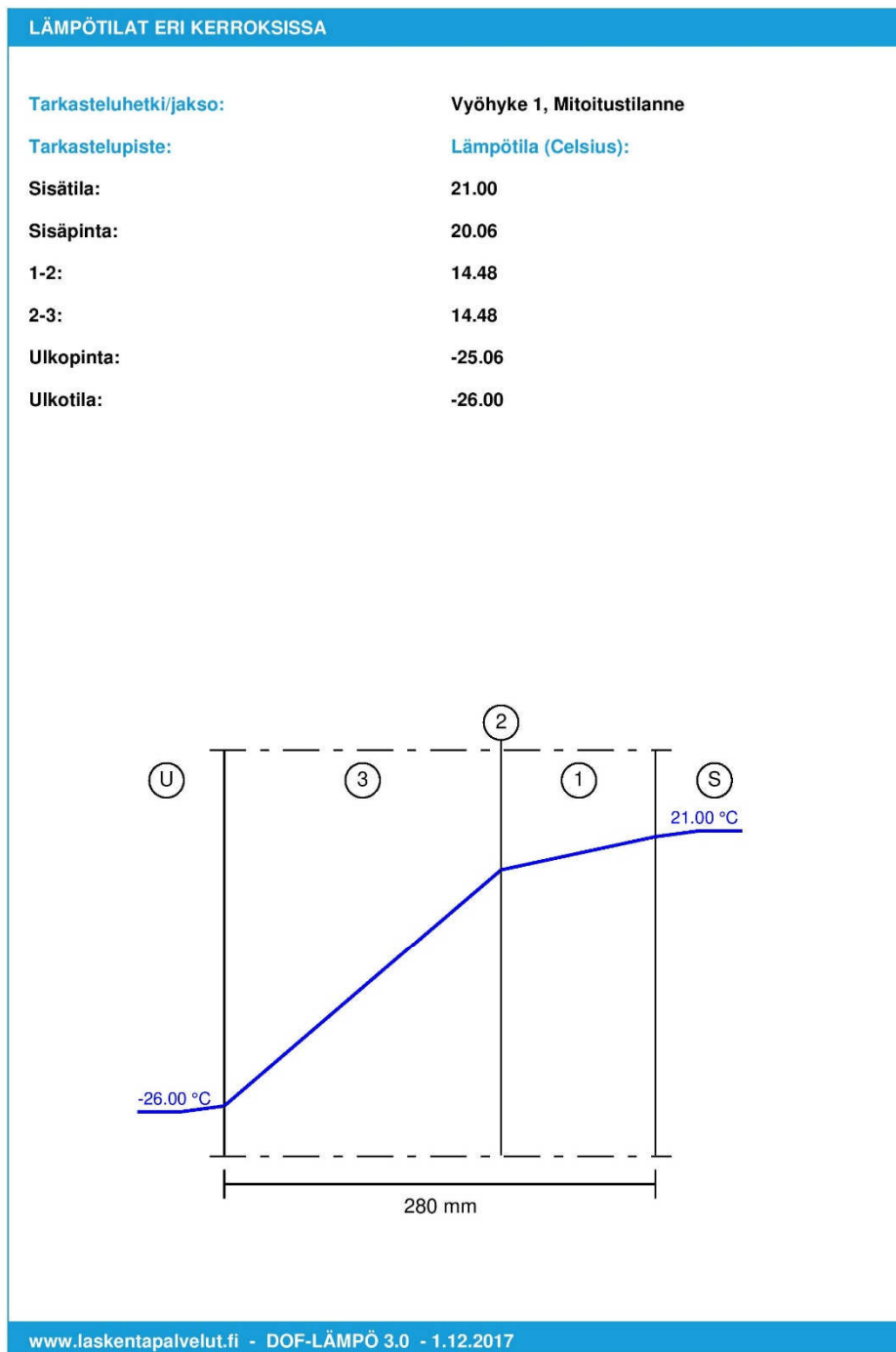
www.laskentapalvelut.fi - DOF-LÄMPÖ 3.0 - 1.12.2017

Kuva L4.6 Ulkoseinän U-arvon laskelmat.

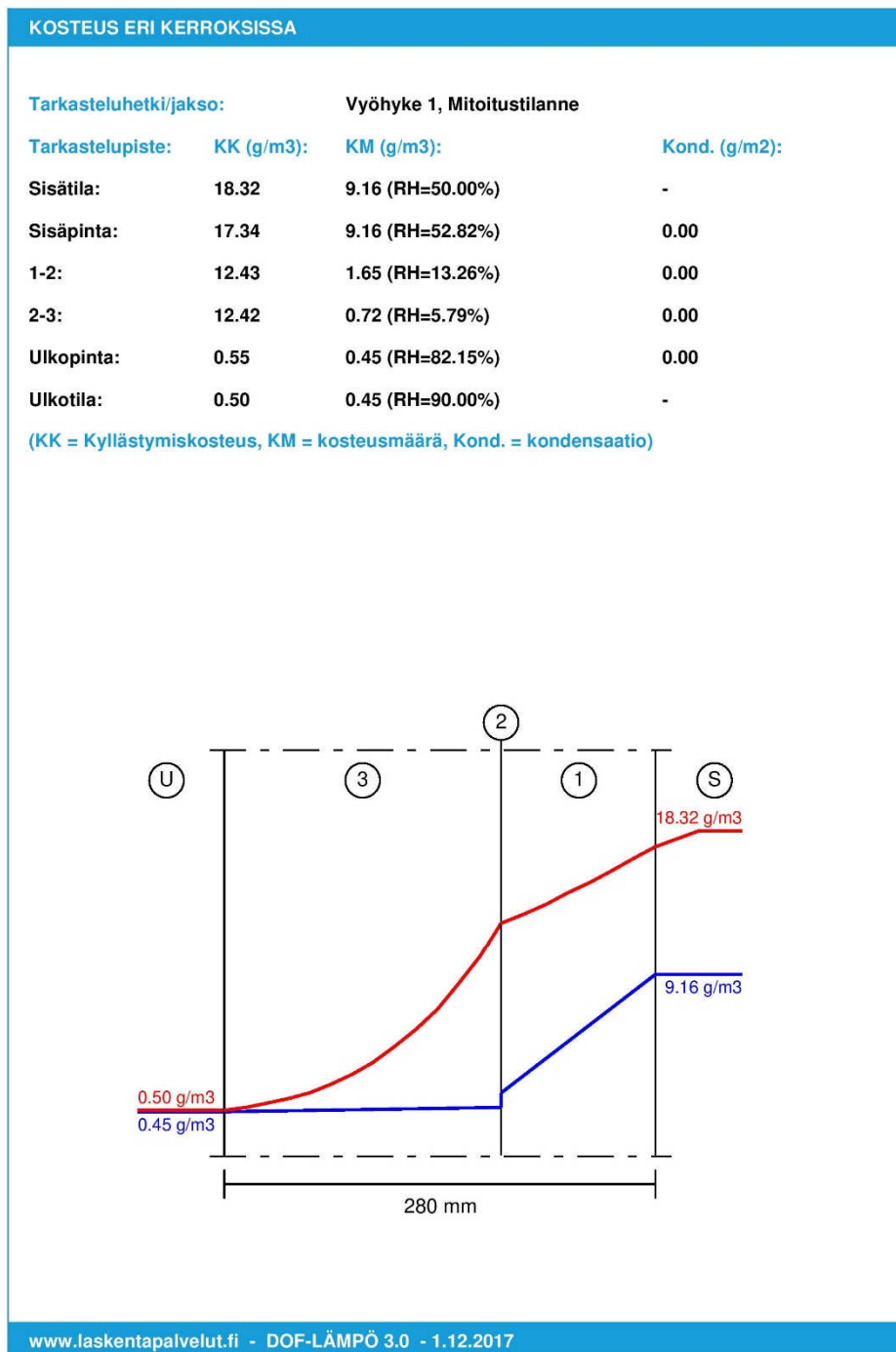
RAKENNEKERROKSET				
Kerros:	Paksuus:	Materiaali:	Lambda:	VHL:
	(mm)		(W/mK)	(kg/msPa)
1	100.00	CLT	0.130	4.000e-12
2	0.30	Ilmansulkupaperi	0.330	9.700e-14
3	180.00	Kivivilla	0.033	2.000e-10

The diagram illustrates the cross-section of a wall assembly. It consists of three main layers: 1 (CLT, 100 mm), 2 (Air barrier, 0.3 mm), and 3 (Rock wool, 180 mm). The diagram is labeled with U (outside), S (inside), and 280 mm (total thickness).

Kuva L4.7 Ulkoseinän U-arvon laskelmat.

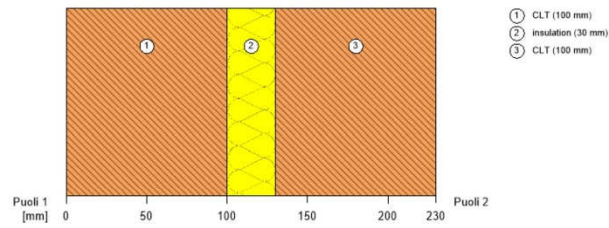


Kuva L4.8 Ulkoseinän U-arvon laskelmat.



Kuva L4.9 Ulkoseinän U-arvon laskelmat.

Järjestelmä



Kerrokset

Puoli 1

Päärakenne

CLT
insulation
Paksuus 30 mm
CLT

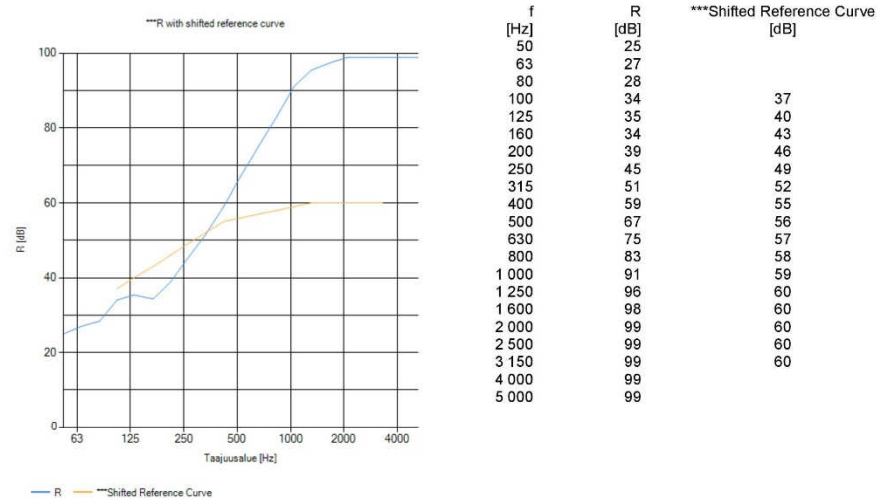
Puoli 2

*** Airborne Sound Insulation Results

R_w 56 dB
 C -3 dB
 C_{tr} -8 dB
 $C_{50-3150}$ -4 dB
 $C_{50-5000}$ -3 dB



Kuva L5.1 Väliseinän ääneneristävyytlaskelmat.



Viiteasiakirjat tätä analyysiä varten	
Arvonimi englanniksi	Kuvaus
SEAP Project Report_02	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis), PILOT STUDY
SEAP Project Report_03	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): Accuracy evaluations
SEAP Project Report_04	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): Calculation Model
SEAP Project Report_05	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): LABORATORY MEASUREMENTS FOR SEVERAL CONSTRUCTIONS FOR STORA ENSO WOOD PRODUCTS ACCORDING TO SS-EN ISO 10140-2:2010 AND 10140-3:2010
SEAP Project Report_07	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): SMALL-SCALE MEASUREMENTS OF FLOOR PACKAGES
SEAP Project Report_08	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis), INTERPRETATION OF RESULTS FROM LABORATORY MEASUREMENTS OF AIRBORNE SOUND INSULATION AND IMPACT SOUND LEVEL
SEAP Project Report_01	Project Report: SEAP (Stora Enso Acoustic Prognosis): REGULATIONS

Vastuuvapauslauseke

Ohjelmisto on suunniteltu auttamaan insinöörejä heidän jokapäiväisessä työssään. Ohjelmiston käyttäjien tulee olla taitavia ja kokeneita insinöörejä, joilla on laajajämmärs rakennesuunnittelusta ja puurakenteisiin liittyvästä rakennusfysiikasta, sillä ohjelmiston tarkoituksena on avustaa vaikeissa rakennesuunnitteluun ja rakennusfysiikkaan liittyvissä tehtävissä. Ohjelmiston käyttäjiä on velvollinen tarkastamaan kaikki ohjelmistoon syötetyt arvot ja tulosten virheettömyys riippumatta siitä, onko käyttäjiä syöttäneet arvot ohjelmistoon itse tai onko arvot ohjelmistoon valmiiksi syötettyjä oletusarvoja. Ohjelmiston tulosten perusteella ei tule tehdä päätöksiä tai toimenpiteitä. Ohjelmiston tulosten käyttö on sallittua vasta kun projektin rakennussuunnittelusta/rakennusfysiikasta vastaava insinööri on tarkastanut tulokset ja hyväksynyt ne oikeiksi ja täydellisiksi. Käyttäjällä on mahdollisuus tulostaa otteita ohjelmistosta, mutta näitä otteita ei saa muokata.

Stora Enso Wood Products GmbH ei anna mitään takuuta tai vakuutusta ohjelmistoon liittyen. Huolimatta siitä, että ohjelmisto on kehitetty mahdollisimman huolellisesti, Stora Enso Wood Products GmbH ei anna suoraan tai epäsuoraan minkäänlaista vakuutusta tai hyväksy minkäänlaista vastuuta ohjelmistolla tuotetun informaation tai datan tarkkuudesta, voimassadosta, oikea-aikaisuudesta tai täydellisyydestä. Stora Enso Wood Products GmbH ei myöskään anna minkäänlaista vakuutusta tai hyväksy vastuuta ohjelmiston yleisestä käytettävyydestä, sen sopivuudesta johonkin erityiseen tarkoitukseen tai yhteensopivuudesta kolmansien osapuolten tuottamien tai toimittamien ohjelmistojen kanssa.

Stora Enso Wood Products GmbH on vastuussa ainoastaan vahingoista, jotka se on aiheuttanut törkeällä tuottamuksesta tai tahallisuudesta. Näin ollen Stora Enso Wood Products GmbH ei vastaa tuottamuksesta aiheutetuista vahingoista, paitsi milloin kyseessä on henkilöön kohdistunut vahinko. Aikaisemmin luettujen ehtojen mukaisesti Stora Enso Wood Products GmbH ei ole vastuussa ohjelmiston toiminnasta tai käyttäjän datan tai ohjelmistojen menettämisestä.

Sovellettava laki: Näihin ehtoihin sovelletaan Italian lakia, lukuun ottamatta sen kansainvälistä lainvalintaa koskevia säännöksiä ja YK:n kansainvälistä kauppalakia (CISG).



Kuva L5.2 Väliseinän ääneneristävyytlaskelmat.